



UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería – ECBTI
Nodo Zona Caribe -CCAV Puerto Colombia
Programa de Química

Síntesis, caracterización y evaluación de aditivos impermeabilizantes
para el diseño de un cemento con resistencia de 250 kgf/cm^2

Trabajo de grado para optar por el título de:

QUÍMICO

Presenta:

Jorge Luis Ramírez Escorcia

73191495

Asesora:

Dra. Nahury Yamile Castellanos Blanco

Bogotá, diciembre de 2019

Agradecimientos

Agradeciendo principalmente a Dios por otorgarme la salud y la fortaleza de realizar unos de mis sueños, ser un profesional, a mi asesora Nahury Yamile Castellanos Blanco con todo el cariño por tener la paciencia y dedicación de su tiempo para guiarme en la construcción de este proyecto, del cual se obtenga un final exitoso.

En especial a mis abuelos materno QEPD siendo los principales en formarme como persona y enseñarme valores que han sido fundamentales en conseguir éxitos en los campos enfrentados diariamente, a mi madre por la valentía de sacarme a delante, a mi padrino QEPD por creer en mí y su valioso apoyo, pero en especial a mi esposa e hijos que sacrificaron su tiempo para darme un caluroso apoyo en los momentos débiles.

Además, a todas las instituciones (Ultracem, Universidad Nacional de Medellín y al profesor Héctor Fabio Cortés de la UNAD, CEAD Medellín, que me ayudaron a obtener conocimiento y facilitar su espacio para culminar exitosamente lo que comencé, este proyecto de investigación como trabajo de grado.

Presentación en eventos académicos

Eventos académicos:

- **1ra SEMANA DE LA QUÍMICA – Programa de Química, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD (ECBTI – CEAD José Acevedo y Gómez). Trabajo (Modalidad Poster):** *Caracterización y evaluación de aditivos impermeabilizantes para el diseño de un cemento con resistencia de 250 kgf/cm².* Bogotá, Colombia, 7 de noviembre de 2018.
- **2da SEMANA DE LA QUÍMICA – Programa de Química, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD (ECBTI – CEAD José Acevedo y Gómez). Trabajo (Modalidad Ponencia):** *Caracterización y evaluación de aditivos impermeabilizantes para el diseño de un cemento con resistencia de 250 kgf/cm²* Bogotá, Colombia, 4 de septiembre de 2019.

Lista de abreviaturas

F_m: resistencia a la compresión máxima en psi o MPa

P: carga máxima de rotura en lbf o N

A: área sobre la que se ha aplicado la carga en in² o mm²

S: superficie específica de la muestra de cemento en estudio, cm²/g.

FB: factor del aparato Blaine.

t: intervalo de tiempo transcurrido durante el descenso del líquido del manómetro en segundos.

C: factor de corrección, (%).

F_{mp}: finura especificada de muestra patrón (%).

R_{mp}: masa del residuo de la muestra patrón retenido en el tamiz (g).

F: finura del cemento corregida (%)

R_m: masa del residuo del cemento retenido en el tamiz (g)

C: factor de corrección del tamiz

E: tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm.

H: tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25 mm.

C: lectura de penetración al tiempo E.

D: lectura de penetración al tiempo H.

L: cambio de longitud en (%).

L_x: diferencias de lecturas finales en mm.

L_i: diferencias de lecturas iniciales en mm.

W: diferencia de masa en el espécimen

A: área del espécimen

S: capacidad de absorción por capilaridad

T(min): tiempo de exposición al agua del espécimen

SEM: microscopia electrónica de barrido

XPS: espectroscopia fotoeléctrica de rayos X

XRF: fluorescencia de rayos X

Tabla de Contenido

Agradecimientos	2
Presentación en eventos académicos	3
Lista de abreviaturas	4
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas.....	8
Lista de gráficos.....	9
Resumen	10
1. Introducción	12
2. Planteamiento del problema	14
3. Justificación	16
4. Objetivo general	19
4.1. Objetivos específicos	19
5. Marco teórico	20
5.1. Propiedades físicas y químicas del cemento.....	20
5.2. Cemento Portland.....	22
5.3. Generalidades y tipos de aditivos para concreto	23
5.4. Norma Técnica Colombiana NTC 1299 concretos, aditivos químicos para concreto	25
5.5. Impermeabilizante en la industria del cemento.....	26
5.6. Residuos plásticos como aditivos para el mejoramiento de la permeabilización	26
5.7. Morteros (usos y ventajas)	27
5.8. Clinker: Principal componente del cemento Portland	27
5.9. Calizas	28
5.10. Yesos.....	28
5.11. Escoria de alto horno.....	29
6. Metodología.....	30
6.1. Etapa 1: Selección y caracterización de las materias primas	30
6.2. Etapa 2: Tratamiento de residuos plásticos para su uso como aditivos.....	31

6.3.	Etapa 3: Designación de ensayos para caracterización de cemento en presencia de aditivos y residuos plásticos	32
6.4.	Etapa 4: Prueba de desempeño para cemento diseñado (análisis de producto)	38
7.	Resultados y discusión.....	42
7.1.	Caracterización química de las materias primas	42
7.2.	Caracterización de aditivos.....	45
7.2.1.	Caracterización de residuos plásticos como aditivos.....	45
7.3.	Determinación de propiedades físicas.....	46
7.3.1.	Finura por aparato Blaine	46
7.3.2.	Finura del cemento por malla 325 (45µ) NTC-291	48
7.3.3.	Fraguado al cemento aguja vicat Método A.....	49
7.3.4.	Determinación de expansión por autoclave	51
7.3.5.	Determinación de resistencia a la compresión.....	53
7.4.	Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a 7 días	55
7.4.1.	Pruebas de Múltiples Rangos.....	56
7.5.	Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a 28 días	56
7.5.1.	Pruebas de Múltiple Rangos	57
7.6.	Cálculo de permeabilidad por capilaridad	58
8.	Conclusiones.....	65
9.	Recomendaciones y perspectivas.	67
10.	Referencias.....	68
11.	Anexos.....	74

Lista de figuras

Figura 1. Reacciones asociadas a la hidratación del cemento	18
Figura 2. Flujograma de proceso para la obtención de material impermeabilizante a partir de plásticos.....	27
Figura 3. Obtención de escoria de alto horno	29
Figura 4. Moldes Humboldt	33
Figura 5. Mezcladora Hobart.....	33
Figura 6. Máquina para resistencia a la compresión	33
Figura 7. Cámara de curado	33
Figura 8. Aparato Blaine	34
Figura 9. Equipo Aguja Vicat Método A	36
Figura 10. Comparador de caratula.....	37
Figura 11. Autoclave.....	37
Residuos pl Figura 12. Mesa de flujoásticos	39
Figura 13. Mesa de flujo	40
Figura 14. Malla 325 NTC-291.....	49

Lista de tablas

Tabla 1. Capacidad producida anualmente por empresas	17
Tabla 2. Composición química del Clinker.....	28
Tabla 3. Requeimientos físicos para tipos de cementos	41
Tabla 4. Caracterización química de materiales.....	42
Tabla 5. Caracterización química de materiales.....	42
Tabla 6. Dodificaciones planteadas	43
Tabla 7. Componentes Primarios calculado.....	44
Tabla 8. Componentes secundarios calculados	44
Tabla 9. Análisis químico de aditivos.....	45
Tabla 10. Análisis químico de residuos plásticos	45
Tabla 11. Codificación de muestras para ensayos.....	46
Tabla 12. Resultados de finura Blaine.....	47
Tabla 13. Resultados finura malla 325	48
Tabla 14. Resultados de fraguados	50
Tabla 15. Resultados expansión por autoclave.....	51
Tabla 16. Resultados resistencia a la compresión	53
Tabla 17. Metodo 95,0 porcentaje LSD.....	56
Tabla 18. Tabla ANOVA	56
Tabla 19. Método 95,0 porcentaje LSD.....	57
Tabla 20. Resultados de permeabilidad por capilaridad	58
Tabla 21. Resultados de permabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 7 días	59
Tabla 22. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 28 días	60
Tabla 23. Resultados XPS para muestras STD y 1,0% de residuos plásticos.....	63

Lista de gráficos

Gráfico 1. Diagrama de fase	39
Gráfico 2. Flujograma de elaboración de cemento a nivel de laboratorio	39
Gráfico 3. Resultados de fraguados	50
Gráfico 4. Representación gráfica de la expansión por autoclave	52
Gráfico 5. Resistencia a la compresión a 7 días.....	54
Gráfico 6. Resistencia a la compresión a 28 días	55
Gráfico 7. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 7 días.	60
Gráfico 8. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 28 días	61
Gráfico 9. SEM de muestra con el 1,0% de residuos plásticos.....	62
Gráfico 10. SEM muestra STD	63

Resumen

En el presente trabajo de investigación se evalúa el efecto de la adición de diversos residuos plásticos a una matriz de cemento Portland buscando mejorar la resistencia del material y su potencial aplicación como aditivo impermeabilizante. Para llevar a cabo esta evaluación se emplearon aditivos comerciales y residuos plásticos en dosificaciones desde 0,5 % hasta 3,0 % en peso, con la finalidad de determinar la dosificación a la cual se obtienen los mejores resultados de resistencia y permeabilidad del producto. El proceso de obtención, caracterización y evaluación de materias primas y productos se realizó a nivel de laboratorio y por medio de los análisis obtenidos, se logró una notable mejora en la resistencia del producto y, por tanto, la aplicabilidad del material como membrana impermeable, resanador de grietas y sellador primario.

Unas de las mejoras evidenciadas en la composición del cemento Portland es su durabilidad, obtenida a partir del ingreso de escorias granuladas de alto horno dentro la dosificación dispuesta a moler (Clinker 45,5%; Yeso 2,4%; Caliza 17,0%; Escoria 35,0%), ya que esta redujo el calor de hidratación y sirvió de relleno en los espacios generados y ocupados por el agua con que se hidrata el cemento. También, se incorporaron escorias para favorecer la durabilidad del cemento, ya que esta se observa con la conservación de la estructura a través del tiempo, en especial el que se emplea comercialmente como cemento de uso general y de Alta Resistencia Temprana (ART), en conjunto con los aditivos comerciales y los residuos plásticos, logrando un material con propiedades mejoradas.

Finalmente, se evaluó la mezcla de cemento obtenida junto con las inclusiones de aditivos, comparando las características de la mezcla con los cementos de uso general y ART, para comprender la acción que realiza la escoria al interior de la matriz cementicia, los efectos producidos por los aditivos impermeabilizantes y los residuos plásticos.

Palabras claves: Aditivo impermeabilizante; Cemento Portland; Escoria; Residuo plástico; Resistencia.

Abstract

Different polymeric residues were added to a cement matrix and their properties were evaluated. The purpose of the present research is to investigate and to improve the resistance of the Portland cement and its application as a waterproofing additive. Commercial additives and plastic waste were added in dosages from 0.5% to 3.0%, in order to obtain good results of resistance and permeability. The Portland cement obtained was studied as an impermeable membrane, waterproofing cracks and primary sealant, and these properties were compared to other mixtures of commercial cement.

The durability was the most important property improved in the composition of Portland cement, since it reduces the heat of hydration and served as a filler in the spaces occupied by the water when cements hydrated. One of the bases of this project was to include the slag, commercial additives and plastic waste as a way to improve properties in different samples of cement, such as commercial general use and *High Early Resistance* (HER).

Finally, the cement obtained was evaluated along with the inclusions of additives and compared to commercially cement to understand the action that slag performs from the cement matrix and the effects produced by waterproofing additives and plastic waste.

Keywords: Plastic waste; Portland Cement; Resistance; Slag; Waterproofing additive.

1. Introducción

Los cementos, según la norma europea UNE-EN 197-1:2011 [1], se definen como “conglomerantes hidráulicos”, esto es, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como al agua” [1]. Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados y de aluminatos hidratados como resultado de la reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico en la construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras. W. Michaelis en el año 1870, desarrolló una teoría con respecto al fraguado y endurecimiento de los conglomerantes hidráulicos, encontrando que no se producen combinaciones cristalizadas; la sílice se halla en estado coloidal y desempeña un papel análogo al que realizan las colas (pegamentos); por tanto, el endurecimiento se produciría como consecuencia de la desecación de la sílice. De esta manera se obtiene que el ortosilicato cálcico ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), es el principal componente del cemento Portland y el silicato tricálcico es una solución sólida de CaO en $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) [1].

En este sentido, el fundamento de este proyecto consiste en la mejora de las propiedades de un cemento Portland a partir de la adición de escoria y utilizando residuos plásticos como aditivos impermeabilizantes, con el fin de mejorar la permeabilidad, endurecimiento y resistencia mecánica, propiedades de gran importancia para el campo constructivo, específicamente para que las edificaciones tengan una mejor solidez en los cimientos y no sufran averiaciones con los fenómenos naturales como sismos o en accidentes provocados por fallas técnicas.

El presente trabajo consiste en la elaboración de un producto cementicio con propiedades de resistencia mejoradas mediante la incorporación de residuos

plásticos, con el propósito de contribuir con un producto que pueda ser comercializado y empleado en procesos de construcción como la elaboración de hormigones, mampostería, impermeabilización, pegado y levante.

Para dar cumplimiento al desarrollo metodológico del presente proyecto se caracterizaron las materias primas, determinando los elementos químicos que las componen y sus propiedades cementicias. Se encontró que los cementos de bajo calor de hidratación se componen de un 62% de Clinker y 35% de escoria con adición de yeso en un 3% máximo. A partir de los elementos que componen el material y su proporción, se formuló un cemento con características de baja hidratación que permitió introducir en su matriz los diferentes aditivos impermeabilizantes y los residuos plásticos propuestos en el trabajo.

2. Planteamiento del problema

Los cementos tienen dos componentes, uno principal que corresponde al material inorgánico especialmente seleccionado y usado mayormente indicando la denominación del tipo de cemento. El segundo es un componente minoritario, que se refiere a cualquier componente principal utilizado en una proporción menor al 5% en masa con respecto a la suma de todos los componentes principales y minoritarios. Mediante adiciones de aditivos cementicios es posible ajustar los contenidos de estos elementos para mejorar propiedades como la resistencia, permeabilidad y curado. Estos aditivos pueden ser plásticos, los cuales se incertan directamente en la matriz del cemento y pueden funcionar como relleno en los poros generados por la hidratación y que son ocupados por el agua [2].

Teniendo en cuenta que en la actualidad existe una problemática de contaminación ambiental en relación con los residuos plásticos de un solo uso, para el desarrollo de este trabajo se utilizaron residuos poliméricos a base de polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y polietilentereftalato (PET) como componentes minoritarios para aditivar y mejorar propiedades del cemento Portland (cemento común), como la impermeabilización, resistencia y su aplicación en el diseño de morteros y concretos en el campo de la construcción.

Por esta razón, el problema que se plantea en el presente trabajo de investigación es el siguiente: *¿es posible mejorar las propiedades fisicoquímicas del cemento portland, específicamente su resistencia, añadiendo a la mezcla diferentes proporciones de residuos plásticos o aditivos impermeabilizantes en dosificaciones desde 0,5 % - 3,0 % en peso?*.

De esta manera, con la implementación de residuos plásticos y aditivos impermeabilizantes, se espera establecer una mejora en la resistencia del cemento Portland, que por resoluciones normativas es de 25 Mpa (250kgf/cm²) durante 28 días [3]. Con la obtención de un cemento con valores iguales o superiores de resistencia, se asegura la calidad del cemento adicionado y es

posible utilizar esta mezcla como membrana impermeable, resanador de grietas y sellador primario.

Hoy en día, el Instituto Nacional de Vías, INVIAS, ha trabajado en la búsqueda de conglomerantes capaces de fraguar y endurecer bajo el agua, y a su vez, adquirir resistencia a la acción agresiva del agua de mar, de aquí nace el criterio experimental de la selección de las materias primas y uso de los residuos plásticos como aditivos para la mejora de la permeabilidad de los diversos tipos de cemento especificados en la norma NTC 4483 (*Uso General y Alta Resistencia Temprana*) [4].

3. Justificación

En la actualidad, existen tres industrias de influencia en campo del cemento a nivel mundial: Argos, Holcim y Cemex, las cuales han venido incursionando en el mercado por medio de la adquisición de las plantas anteriormente mencionadas, además de algunas otras empresas posicionadas en el mercado nacional como Ultracem, Oriente, Moctezuma, Vallenato Y Patriotas.

CEMEX (empresa que adquirió cementos Diamante y Samper). Es la compañía cementera más grande del continente americano y una de las tres principales en el mundo, con una capacidad de producción anual cercana a los 5,5 millones de toneladas.[25] Es, además, el mayor comercializador internacional de cemento y el mayor productor de cemento blanco en el mundo, ya que produce, distribuye y vende cemento, concreto premezclado en cuatro continentes.

ARGOS (su grupo consta de cementos Argos, cementos El Cairo, Caribe, Paz del Río, Nare, Rio Claro, Tol cemento, Andino, Concrecem y Cementos del Valle). Es una empresa con 70 años de historia en el país y líder en la industria cementera con 8,7 millones de toneladas, con un 40% de participación en el mercado y quinto productor de cemento en América Latina.

HOLCIM (propietario de Cementos Boyacá entre otras empresas). Es una de las multinacionales con mayor demanda a nivel mundial, la cual forma un grupo sólido con Argos y Cemex, y presenta una producción de 2,0 millones de toneladas anuales [25]. Estas son las cementeras con mayor consumo en Colombia, las otras participantes son menores, dentro de las cuales Ultracem ocupa el primer lugar con 1,0 millón de toneladas producidas anualmente y cuyas cifras se indican en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Capacidad producida anualmente por empresas

**CAPACIDAD INSTALADA
POR EMPRESA**



CEMENTERA	Capacidad (t/año)
Argos	8,700,000
Cemex	5,500,000
Holcim	2,000,000
Ultracem	1,000,000
Cemento Oriente	630,000
Cemento Vallenato	130,000
Patriotas	60,000

* Tomado de <https://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/estado-de-las-cementeras-en-colombia/256335>

La creciente demanda de aditivos por parte de cada una de las empresas antes mencionadas, tales como Sika-1, Krystaline-1 y Henkel, lleva a diseñar cementos con mejores propiedades mecánicas y reológicas para que su producción requiera menos consumo de energía en el proceso, sin embargo, muchas veces el costo de producción es elevado debido al precio de estos aditivos.

De esta manera, en el presente proyecto se presenta el tratamiento e implementación de residuos plásticos como aditivos impermeabilizantes en una mezcla de cemento Portland para la obtención de un nuevo producto con características y propiedades de resistencia mejoradas, a partir del establecimiento de los parámetros óptimos de dosificación que otorgan una mayor durabilidad de la mezcla de cemento. Para producir un cemento con propiedades mejoradas es necesario entender las transiciones estructurales en estado sólido, así como las reacciones que se presentan durante el proceso de hidratación, como la interacción entre el cemento y el agua, la cual da lugar a la formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) que influyen en la mayoría de la propiedades físicas y mecánicas del cemento (**Figura 1**) [5].

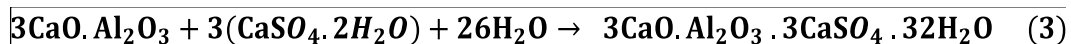
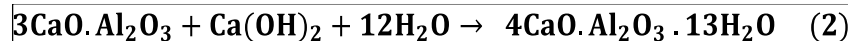
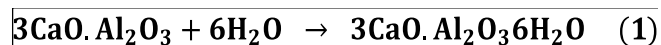


Figura 1. Reacciones asociadas a la hidratación del cemento

Con este conocimiento, se podrán estudiar las variables tecnológicas y el comportamiento del producto final, mediante la optimización de propiedades como la permeabilización y la resistencia de un cemento Portland con la finalidad de lograr la mejora en las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla inicial, compuesta por CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaCO₃ (caliza) y agua como componentes principales.

4. Objetivo general

Evaluar los diferentes factores químicos y físicos asociados a la calidad del cemento, para el diseño de un producto cementicio impermeabilizante a base de aditivos o residuos plásticos sobre un diseño de mezcla de 250 kgf/cm².

4.1. Objetivos específicos

- Caracterizar las materias primas y aditivos bajo la norma NTC 321 mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X, espectroscopía fotoeléctrica de rayos X y microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar y estudiar la dosificación de aditivos impermeabilizantes y residuos plásticos como materias primas, para la obtención de cemento Portland con resistencia de 250 kgf/cm².
- Determinar las propiedades físicas del cemento, antes y después de las dosificaciones realizadas, con el fin de comparar la resistencia de compresión del cemento diseñado en presencia de los aditivos plásticos utilizados y definirlos según su criterio.
- Comparar la influencia del tiempo en el coeficiente de permeabilidad de la mezcla patrón y en las muestras con los aditivos seleccionados para mejorar su resistencia a la penetración de sulfatos (SO₄⁻²) y cloruros (Cl⁻¹).

5. Marco teórico

5.1. Propiedades físicas y químicas del cemento

Los cementos pertenecen a la clase de materiales denominados aglomerantes en construcción. Como la cal aérea y el yeso (no hidráulico), el cemento endurece rápidamente y alcanza una alta resistencia, esto gracias a reacciones de combinación entre el sistema cal – sílice [6].

Entre las propiedades físicas que pueden determinarse cuantitativamente se encuentran:

- Superficie específica o finura Blaine.
- Tiempo de fraguado
- Falso fraguado
- Resistencia mecánica
- Contenido de aire
- Calor de hidratación

En cuanto a las propiedades químicas del cemento se distinguen las siguientes:

- Módulo fundente
- Compuestos secundarios
- Pérdidas por calcinación
- Residuo soluble

Para la caracterización de los componentes químicos elementales que constituyen el cemento, se emplean métodos de análisis como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopía fotoeléctrica de rayos X (XPS), los cuales brindan la siguiente información:

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Es una técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones materia-energía. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Este ensayo es importante

para la caracterización de las muestras debido a que se puede ver las formaciones de cristales por parte de la hidratación, como también los tamaños de partícula de la muestra para observar su homogeneidad [7].

Espectroscopia Fotoeléctrica de rayos X (XPS):

La espectroscopia XPS es una técnica cuantitativa fundamentalmente empleada para estudiar la superficie de un material. La espectroscopia XPS permite determinar la composición elemental (cualitativa y cuantitativa) y los estados de oxidación de los elementos presentes en el material. Esta técnica se emplea de forma rutinaria en la caracterización de polímeros, aleaciones, semiconductores, minerales, tintas, adhesivos, materiales inorgánicos, vidrios, películas delgadas, recubrimientos, etc., y en el estudio de procesos/efectos de superficie como segregación, difusión, adsorción, absorción y desorción, corrosión, degradación, adhesión, soldadura, contaminación, limpieza, recubrimiento, funcionalización, entre otros.

Con este método se pueden conocer los elementos que componen la muestra, en especial los óxidos que componen la muestra cementicia [8].

Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX):

Se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, convenientemente colimada, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico d) que la difracta en un ángulo (θ) dependiente de su longitud de onda (λ) por la ley de Bragg ($\sin \theta = n\lambda/2d$). Un detector que puede moverse sobre un determinado rango de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia.

5.2. Cemento Portland

Se denominan cementos a los conglomerantes hidráulicos que al ser amasados con agua fraguan y se endurecen sumergidos en este líquido y son prácticamente estables al contacto. Se denomina cemento Portland al producto obtenido por una mezcla íntima de calizas y arcillas, la cocción de la mezcla es llevada hasta sinterización y molienda del producto resultante que es el Clinker, con una pequeña adición de yeso, a un grado de finura elevado [8].

El Clinker del cemento Portland está compuesto principalmente por silicato tricálcico (SC_3), silicato bicálcico (SC_2), aluminato tricálcico (AC_3) y aluminoferrito tetracálcico (AFC_4), además de componentes secundarios como el yeso, los álcalis, la cal libre y la magnesia libre. Uno de los parámetros más importantes en la fabricación de este material, es el índice de hidraulicidad, ya que este permite comprender la hidratación que sufrirá el cemento, la cual dependerá de la pureza de los elementos principales en la composición como el calcio (CaO), Silice (SiO_2), Alumina (Al_2O_3) y magnesio (MgO), por otra parte, actúa como adherente y aglutinante en la realización de morteros y concreto.

Hay dos tipos de cementos, dependiendo su origen: el cemento de origen arcilloso, logrado a partir de arcilla y piedra caliza; y el puzolánico, que contiene puzolana, un material aluminio silíceo que empleaban en la antigua Roma para producir el cemento. La puzolana puede provenir de volcanes y su origen es de tipo orgánico.

Por lo expuesto, el cemento es considerado como un material conglomerante que es capaz de unir partes de varios materiales y darles cohesión a partir de diversas modificaciones químicas.

Cabe destacar, que cuando se mezcla con agua, arena y grava se obtiene el hormigón o concreto, una mezcla de tipo maleable y uniforme que también dispone de un uso extendido en ingeniería y en construcción.

Entre sus propiedades más notables se encuentran: la resistencia a la invasión química y resistencia a temperaturas elevadas.

Desde tiempos remotos, se necesitaron mezclas especiales para construcciones. En la Antigua Grecia era frecuente el uso de tobas volcánicas para la obtención del cemento, es decir, se conseguía únicamente de modo natural, en tanto en el siglo XIX (año 1824), se llevó a cabo una revolución cuando el fabricante de cemento británico Joseph Aspdin patentó el cemento Portland, que se llamaba así por la coloración verde oscuro, similar a la piedra Portland [9].

5.3. Generalidades y tipos de aditivos para concreto

Un aditivo es un material que se añade al hormigón o mortero antes o durante el mezclado, además del cemento, agua y áridos. El objeto de añadir aditivos al cemento es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee, y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido. Se presenta en forma de polvo o líquido. Los aditivos líquidos se emplean diluidos en agua y los aditivos en polvo se prefiere sean agregados directamente al cemento. Se aplican en dosis pequeñas que varían de entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento y su efecto es de índole físico, químico o fisicoquímico [10]. Esta dosis empleada tiene directa relación con la magnitud del efecto, debiéndose en todo caso, respetar los límites recomendados por el fabricante y el aporte de sustancias dañinas en el hormigón. Los aditivos se pueden clasificar como:

➤ Aditivos incorporadores de aire

El aditivo inclusor de aire permite generar durante el mezclado del concreto un sistema de pequeñas burbujas de 0,025 a 0,100 mm espaciadas uniformemente en toda la masa del concreto [10]. El sistema de burbujas provee al concreto una resistencia especial contra el intemperismo (transformación química de las rocas en el suelo), en particular protege al concreto del deterioro producido por las heladas o los ciclos de congelamiento y deshielo, por esta razón se dice que el aire introducido mejora la durabilidad del concreto. La cantidad de aire que se debe introducir depende de la protección deseada, en el caso de la protección

contra el problema de congelamiento-deshielo se emplea de 4 a 6% de aire en volumen [10].

➤ **Aditivos plastificantes (reductores de agua)**

El aditivo plastificante reductor de agua para concreto es un aditivo químico en estado líquido, que incrementa la fluidez de una mezcla de concreto, por lo tanto, se clasifica como aditivo plastificante, reductor de agua e incrementador de resistencias del fraguado normal. Un concreto con este aditivo tiene una consistencia más plástica y más manejabilidad que otro concreto sin este aditivo con la misma relación agua/cemento, esta ganancia en resistencia es considerable.

➤ **Aditivos retardadores**

Los aditivos retardadores de fraguado se emplean para retrasar el tiempo de fraguado del concreto, dando con esto más tiempo para el manejo del concreto en la obra, especialmente cuando se trata de colados grandes y cuando no se cuenta con suficiente personal. Este tipo de aditivos son de mucha utilidad cuando los trabajos se tienen que realizar en climas calidos y/o cuando se espera que el transporte del concreto tome mucho tiempo.

➤ **Aditivos aceleradores**

Los aditivos aceleradores tienen el propósito de lograr que el concreto desarrolle resistencia rápida, por lo tanto, aceleran el proceso de fraguado del cemento. El empleo de este aditivo es útil cuando se desea descimbrar para acelerar el programa de construcción, en ocasiones la falta de cimbra hace que se use este aditivo con el objeto de remover de forma acelerada el armazón que sostiene la construcción para volver a usar la cimbra en el siguiente colado. En ocasiones, cuando se tiene que colar en un ambiente frío también se usan acelerantes para contrarrestar los efectos de las bajas temperaturas, las cuales normalmente retrasan el fraguado del concreto, con el peligro adicional de que, si la temperatura continúa bajando, el concreto puede llegar a congelarse.

➤ **Aditivos impermeabilizantes**

Aditivos utilizados para reducir la permeabilidad en todo tipo de concreto expuesto

al agua, principalmente en cimentaciones, tanques de almacenamiento de agua, sistemas de alcantarillado, canales, losas, entre otros.

➤ **Aditivos expansivos**

Aditivos que se expanden durante el período de hidratación del hormigón o reaccionan con otros componentes del hormigón para causar expansión; se utilizan para reducir al mínimo los efectos de la contracción por secado.

La expansión controlada producida por estas adiciones puede ser de la misma magnitud que la contracción por secado esperado o puede ser levemente mayor.

5.4. Norma Técnica Colombiana NTC 1299 concretos, aditivos químicos para concreto

En Colombia, los aditivos para ser utilizados en el concreto se rigen por la Norma Técnica Colombiana NTC 1299 [10]. Sin embargo, existen en el mercado una serie de productos no clasificados dentro de esta norma que son muy importantes y ampliamente empleados.

Los aditivos son ingredientes del concreto o mortero que, además del agua, agregados como el cemento hidráulico y en algunos casos fibra de refuerzo, son adicionados a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Se utilizan con el objeto de modificar las propiedades del concreto o mortero, ya sea en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido, para hacerlo más adecuado según el trabajo o exigencia dada y para que cumpla los requisitos y especificaciones particulares de cada tipo de estructura. Las características adquiridas mediante el uso de aditivos, que en muchos casos no se pueden lograr por otros métodos o en forma económica son:

- Mejorar el desempeño de una mezcla de concreto ante determinadas solicitudes.
- Asegurar la calidad del concreto en condiciones ambientales severas durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado.

5.5. Impermeabilizante en la industria del cemento

En la industria, es de gran importancia implementar características que representen una innovación en los productos que se realizan para el consumidor. En las plantas de cemento, las metodologías innovadoras de productos convencionales utilizados para la preparación de hormigones y morteros para el sector constructor son fundamentales para competir en el mercado.

La creación de un producto impermeabilizante constituye una innovación muy interesante, ya que hoy en día en las edificaciones existen parqueaderos subterráneos, azoteas, piscinas, entre otras, creados debido a la necesidad de brindar no solo un tipo de concreto o mortero, sino también, un producto que cumpla con las expectativas del cliente en las realizaciones de sus proyectos constructivos. Las características de los productos que hay en el mercado proporcionan mejoras en las propiedades físicas y mecánicas en el cemento para la realización de morteros y concretos. La iniciativa es implementar residuos plásticos como aditivos en la fórmula del cemento para mejorar la permeabilidad sin que esto afecte directamente las propiedades mecánicas del material [11].

5.6. Residuos plásticos como aditivos para el mejoramiento de la permeabilización

Los residuos plásticos son reciclados mediante procesos similares a los de su fabricación original. Aprovechando su comportamiento con los cambios de temperatura, pueden ser llevados por calentamiento a su estado elasto-plástico y en estas condiciones lograr una nueva forma. Mediante enfriamiento, estos residuos alcanzan su estado sólido conservando la forma adquirida en el estado elasto-plástico [12].

Este proceso se puede repetir una y otra vez, dependiendo de su estado físico, de la contaminación con otros materiales, de la presencia de aditivos de protección y de las condiciones del proceso como se ilustra en la **figura 2**.

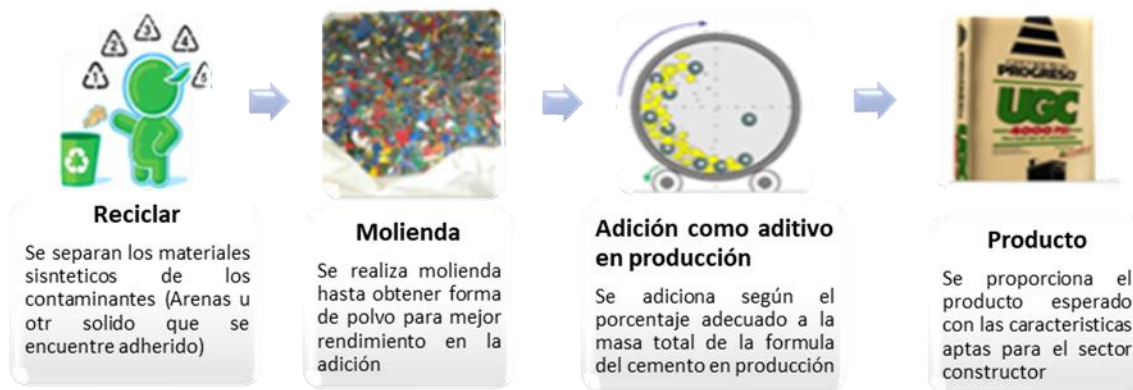


Figura 2. Flujograma de proceso para la obtención de material impermeabilizante a partir de plásticos. Tomado de
http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323/2s06/projects/GerardoAlvarez/proyecto_final.html

5.7. Morteros (usos y ventajas)

El mortero es uno de los elementos básicos de la construcción. Su composición y dosificación ha ido evolucionando, así como su tecnología de fabricación y puesta en obra. Los morteros se utilizan para unir piezas de albañilería (ladrillos, bloques, tejas, losetas, etc.) entre ellas o a un soporte, o también como recubrimiento protector de muros tanto interiores como exteriores. También sirve como relleno, como soporte de otros materiales, entre otros.

Debido a su impulso tecnológico los morteros han logrado reposicionar su importancia dentro del proceso de terminación y calidad de obra, gracias a la correlación entre los diseños y su aplicación en los procesos de elaboración y manipulación. Las propiedades de los morteros se pueden ver profundamente modificadas respondiendo a condiciones y características predeterminadas, por lo que los morteros industriales se hacen imprescindibles en cualquier edificación. [13].

5.8. Clinker: Principal componente del cemento Portland

Se define como Clinker al producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos que contienen óxido de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente calculadas.

El Clinker es el producto principal del cemento, por ello, es el más importante componente del hormigón. Su nombre proviene del color gris característico, similar al color de la piedra propia de la región de Portland, cerca de Londres. Se forma a partir de la calcinación de caliza y arcilla a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450 °C [14].

Su composición química se especifica en la **tabla 2** [14]:

Tabla 2. Composición química del Clinker

Fase	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato bicálcico	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferrito aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$

5.9. Calizas

Son rocas sedimentarias compuestas mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3) aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas, permite reconocerlas fácilmente gracias a dos de sus características físicas y químicas fundamentales: menor dureza que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacción efervescente en presencia de ácidos, tales como el ácido clorhídrico [15].

5.10. Yesos

EL yeso se define como el producto resultante de la deshidratación parcial o total de algez o piedra de yeso compuesto casi exclusivamente de sulfato de calcio con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En su estado puro contiene 79,07% de sulfato de calcio anhidro y 20,93% de agua, abunda en terrenos sedimentarios y

es incoloro o blanco, pero generalmente se encuentra acompañado de impurezas como arcillas, óxido de hierro, sílice, caliza, etc. Se utiliza principalmente para revestimientos interiores, elementos decorativos o acabados en muros. Su uso en el cemento tiene como función principal disminuir la velocidad en que crecen los productos de hidratación de los aluminatos, incrementando el tiempo de fraguado de la pasta o concreto [16].

5.11. Escoria de alto horno

Las escorias de alto horno son materiales muy utilizados como aditivos para la elaboración de distintos cementos comerciales. Estos cementos siderúrgicos tienen algunas propiedades y características sensiblemente mejores que los cementos Portland ordinarios, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y al agua de mar, así como una reducción muy apreciable a la reacción árido-álcalis. Sin embargo, pese a ello existen aún muchos interrogantes en torno a estas escorias y fundamentalmente respecto a los factores o parámetros que afectan su comportamiento hidráulico (**Figura 3**) [17].

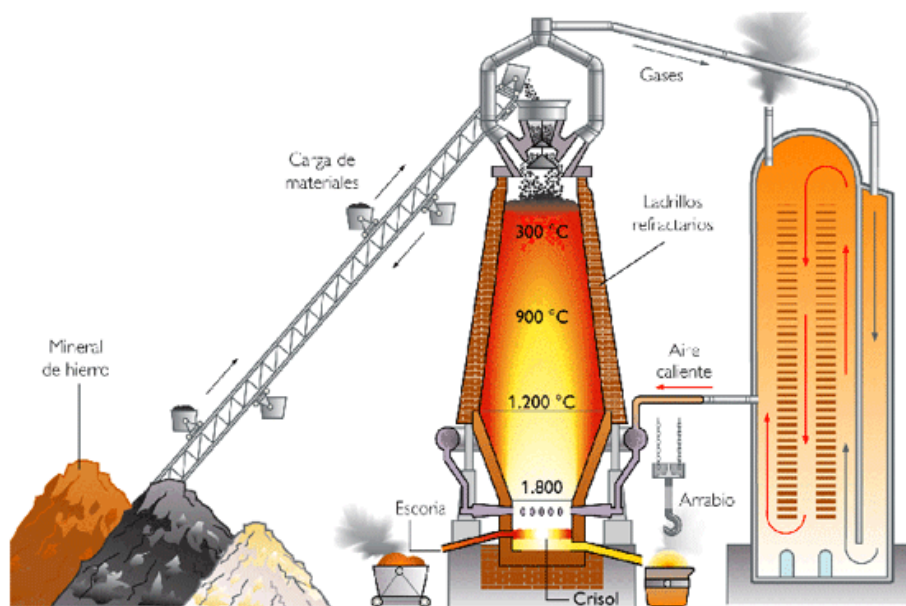


Figura 3. Obtención de escoria de alto horno tomado de https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/422_horno_alto.html

6. Metodología

6.1. Etapa 1: Selección y caracterización de las materias primas

Inicialmente se realizó la caracterización de los materiales como el Clinker, yeso, caliza y escoria de alto horno (proporcionados por la empresa Xamtec S.A.S) con los cuales se realizó el diseño del cemento estándar. La técnica espectroscópica que se empleó para conocer los porcentajes en peso de los elementos químicos presentes fue la fluorescencia de rayos X (XRF) y para los aditivos se utilizó la técnica de espectroscopia fotoeléctrica de rayos X (XPS), la técnica de microscopía electrónica de barrido se empleó para la formulación denominada como estándar (STD) y las inclusiones de aditivos mas relevantes en los resultados emitidos.

La dosis adecuada de cada material se determinó con base al diagrama de ternarios el cual proporciona una mejor ubicación para iniciar una apropiada dosificación de las materias primas. Los análisis de FRX fueron realizados en la empresa Xamtec S.A.S (outsourcing) en conformidad con la carta de intención expresa en el presente trabajo **(Anexo 1)**.

En este sentido, las materias primas empleadas son:

Clinker: Componente de mayor proporción, es el cuerpo estructural del cemento donde se encuentran los minerales específicos que permiten las reacciones de hidratación y dureza. Dentro de estos componentes se encuentra el silicato tricálcico (40 a 60%), silicato bicálcico (20 a 30%), aluminato tricálcico (7 a 14%) y ferrito aluminato tetracálcico (5 a 12%).

Yeso: Materia prima compuesta por sulfato de calcio dihidratado, es utilizado en la industria del cemento para regular el proceso de hidratación o el fraguado del cemento.

Calizas: Material compuesto mayoritariamente de carbonato de calcio y otras impurezas como óxidos de hierro, sílice, alúmina, entre otros. Son utilizadas como

relleno para que las molientes sean más productivas y para la disminución de costo en el proceso.

Escorias de alto horno: Submaterial del proceso metalúrgico de importancia en la industria del cemento ya que se utiliza como aditivo para mejorar propiedades físicas y mecánicas del cemento.

Con base en los porcentajes de los materiales descritos anteriormente, además de la determinación de las propiedades físicas y químicas que se detallan en la siguiente etapa del presente trabajo de investigación, se incorporaron residuos plásticos para mejorar la resistencia de la materia prima de partida, y de esta manera contribuir con la fabricación de un producto de alto valor agregado en la industria cementicia. Este último punto se describe en la siguiente etapa de la propuesta.

6.2. Etapa 2: Tratamiento de residuos plásticos para su uso como aditivos

De acuerdo con las especificaciones indicadas en la literatura para el tratamiento de residuos plásticos [12], es necesario que estos materiales se encuentren en un ambiente en el que no reciban rayos solares con el fin de evitar la pérdida de algunas propiedades como la resistencia, durabilidad y la desintegración del material. Para el proceso de reciclado existen diferentes tecnologías para el tratamiento primario, secundario, terciario y cuaternario de plásticos.

De acuerdo con lo anterior, para el desarrollo de este trabajo se empleó el tratamiento terciario y mixto, que consiste en la separación de las partículas contaminantes del material reciclado que en su mayoría son materiales orgánicos [12]. La mezcla inicial de residuos plásticos utilizada para el desarrollo de este trabajo contiene una mezcla de los siguientes polímeros: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), polietilentereftalato (PET), dicha mezcla fue utilizada como subproducto para aditivar y mejorar propiedades físicas del producto cementicio desarrollado [18].

6.3.Etapa 3: Designación de ensayos para caracterización de cemento en presencia de aditivos y residuos plásticos

Para la elaboración de los ensayos se empleó Clinker, yeso, caliza y escoria, para obtener un cemento patrón, posteriormente se llevó a cabo la inclusión de los aditivos denominados Sika-1, Krystaline-1, Henkel, los residuos plásticos obtenidos en la etapa 2 y arena silíceo gradada normalizada como agregado para la elaboración del mortero.

Las propiedades determinadas son:

Resistencia a la compresión: La prueba de resistencia a la compresión mide la capacidad del cemento para resistir fuerzas de presión. Esta se realizó mezclando cemento, agua y arena para crear el mortero de cemento, se probaron las muestras en cubos en condiciones controladas, para determinar su resistencia a la compresión. La hidratación se produjo a ritmos diferentes, por lo que el cemento Portland alcanzó diferentes niveles de resistencia con el tiempo. Las pruebas se realizaron a siete (7) y veintiocho (28) días. Después de que cada muestra se endureció en un tiempo específico (durante 24 horas para su desmolde) y luego de realizar los tiempos de curados establecidos, se colocó bajo una carga de compresión, en una máquina hidráulica hasta que se quiebra. Se analizaron los resultados de acuerdo con los requisitos de resistencia a la compresión especificados por la norma internacional, NTC121[19]. Se registró la carga máxima de la prensa y se calculó la resistencia como se muestra en la ecuación 4,

$$Fm = P/A \quad (4)$$

Donde,

Fm: es la resistencia a la compresión máxima en psi o MPa

P: es la carga máxima de rotura en lbf o N

A: es el área sobre la que se ha aplicado la carga en in² o mm²

Para realizar este ensayo se utilizó moldes Humboldt con cavidad de 3 cubos de 4 pulgadas como se indica en la **figura 4**. Mezcladora tipo Hobart que se aprecia en la **figura 5**. Cámara de curado con humedad y temperatura controlada como se

aprecia en la **figura 6**. Máquina de resistencia a la compresión marca control como se muestra en la **figura 7**.



Figura 5.Mezcladora Hobart



Figura 4. Moldes Humboldt



Figura 7. Cámara de curado



Figura 6. Máquina para resistencia a la compresión

Finura Blaine: El ensayo se realizó midiendo el tiempo en que una columna de agua descende una altura dada. Este método depende del flujo de aire a través de un lecho de cemento preparado en la celda del aparato (permeabilímetro de Blaine, **figura 8**). El flujo de aire está dado en función del tamaño y número de poros, lo cual está dado por el tamaño de partícula. Para determinar la superficie específica, se consideró a las partículas como esferas. El área superficial se expresa en m^2/kg o cm^2/g de cemento.

La finura Blaine se determinó de la siguiente forma (**ecuación 5**):

$$S = FB * \sqrt{t} \quad (5)$$

Donde,

S: superficie específica de la muestra de cemento en estudio, cm^2/g .

FB: factor del aparato Blaine.

t: intervalo de tiempo transcurrido durante el descenso del líquido del manómetro en segundos [20].



Figura 8. Aparato Blaine

Finura malla 325 (45µm): El método de ensayo que se aplicó para determinar la finura del cemento hidráulico determina la capacidad de reacción del cemento con el agua (hidratación) y la rapidez con que esta reacción sucede. La finura del material se calculó de la siguiente manera [20]:

1. se calibró la malla de la siguiente forma: se colocó 1g de la muestra patrón de cemento sobre la malla limpia y seca, el factor de corrección del tamiz se calculó con la siguiente ecuación (N°6):

$$C = \frac{\frac{100 - F_{mp}}{100} - R_{mp}}{R_{mp}} * 100 \quad (6)$$

Donde,

C: factor de corrección, (%).

F_{mp}: finura especificada de la muestra patrón (%).

R_{mp}: masa del residuo de la muestra patrón retenido en el tamiz (g).

2. se pesa 1 g de la muestra para ensayar se coloca en la malla con una presión de agua constante de 10 Mpa realizando giros circulares por un minuto.
3. se seca el material a 100 °C a peso constante y luego se pesa el material retenido.

La finura corregida se calculó de acuerdo con la **ecuación 7**:

$$F = 100 - [R_m(100 + C)] \quad (7)$$

F: finura del cemento corregida (%)

R_m: masa del residuo del cemento retenido en el tamiz (g)

C: factor de corrección del tamiz [20]

Fraguado aguja Vicat Método A: La determinación de los tiempos de fraguado Vicat se realizó en pastas de cemento hidráulico de consistencia normal, preparados en un cuarto de curado donde inició el proceso de fraguado. Se realizó penetraciones periódicas en la pasta utilizando la aguja de Vicat de 1 mm de diámetro. El tiempo de fraguado inicial Vicat, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la penetración medida o calculada es de 25 mm. Por su parte, el tiempo de fraguado final Vicat es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial y el instante en el cual la aguja no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta [20].

El tiempo de fraguado se calculó de la siguiente forma (**ecuación 8**):

$$\left[\left[\frac{(H-E)}{(C-D)} \right] * (C - 25) \right] + E \quad (8)$$

Donde,

E: tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25mm.

H: tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25mm.

C: lectura de penetración al tiempo E.

D: lectura de penetración al tiempo H.

Este ensayo se realizó con los equipos de Aguja Vicat del método A como se aprecia en la **figura 9**.



**Figura 9. Equipo Aguja
Vicat Método A**

Expansión de barras por autoclave: Este ensayo normalizado por la ASTM C151 acelera la eventual acción de la cal libre y la estabilidad de la muestra garantiza la calidad del cemento. Como un indicador adicional, puede considerarse que un cemento con bajo contenido de residuo insoluble, es un cemento bien calcinado y con escaso riesgo de cal libre.

La expansión se calculó mediante la siguiente ecuación 9:

$$L = 100 * (L_x - L_i) / G \quad (9)$$

Donde,

L: cambio de longitud en (%).

L_x: diferencias de lecturas finales en mm.

L_i: diferencias de lecturas iniciales en mm.

Este ensayo se realizó con equipo de autoclave y comparador de carátula como se aprecia en la **figura 10** y **figura 11** respectivamente.



Figura 11. Autoclave



Figura 10. Comparador de caratula

Permeabilidad por capilaridad: La permeabilidad se define como la propiedad que establece la aptitud de un medio poroso a ser atravesado por un fluido en presencia de un gradiente de presión. Para obtener esta propiedad se aprovechó la realización de los especímenes en la prueba de resistencia para separar 2 cubos por cada prueba para su previo cálculo. El ensayo se realizó sometiendo los especímenes en la cámara de curado de acuerdo a los días designados (7, 28 días), al ser retirados a cada tiempo se deben secar a 50°C por 24 horas a peso constante garantizando que estén totalmente secos, los cubos se deben someter en agua con una altura de 15mm por diferentes tiempos (30, 60, 90, 120 y 1440 minutos), si inicialmente se determinó a 7 días se deben colocar nuevamente en la cámara de curado hasta 28 días y realizar el procedimiento anterior, luego de este último se desechan los especímenes [21]. La permeabilidad de la pasta depende también de la relación agua/cemento y del grado de hidratación del cemento, además de la duración y calidad del curado.

La absorción por capilaridad se calculó de la siguiente forma (**ecuación 10**) [21]:

$$\frac{W}{A} = S * \sqrt{t} \quad (10)$$

Donde,

W: diferencia de masa en el espécimen

A: área del espécimen

S: capacidad de absorción por capilaridad

t: tiempo de exposición al agua del espécimen expresado en segundos

6.4.Etapa 4: Prueba de desempeño para cemento diseñado (análisis de producto)

Se elaboraron morteros empleando 1 parte de cemento y 2,75 partes de arena silíceas incorporando porcentajes de los diferentes aditivos y del residuo plástico de acuerdo con el peso seco del cemento, excepto con el aditivo Sika 1 ya que este es líquido y para esta prueba se debe considerar el agua de amasado a utilizar en la mezcla del mortero. Para este proceso se tomó como referencia los estándares de las pruebas NTC 220[30], método de prueba estándar para la elaboración de especímenes cúbicos y determinación de la fuerza a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de dos pulgadas (5,08 cm).

Las muestras fueron separadas para realizar el ensayo de permeabilidad al agua según norma NTC 4483, y pasta para determinaciones de permeabilidad al aire (Blaine), tiempo de fraguado y finura por malla 45 μ m (N°325). [20]

Para el diseño del cemento se incorporaron aditivos impermeabilizantes y residuos plásticos en diferentes proporciones, posteriormente se seleccionaron las materias primas que comúnmente se utilizan en las fábricas productoras, por ejemplo, el Clinker (materia prima mayoritaria), a partir de esta se definen las propiedades fisicoquímicas del producto; el yeso, la caliza y escorias de alto horno.

Como primera medida, se realizó un análisis químico de elementos que componen las materias primas con el método espectroscópico de fluorescencia de rayos X, con el fin de diseñar un producto conforme a la norma NTC 321 y que también cumpla con las propiedades hidráulicas según norma NTC 121 [10], a partir de aquí se incorporan los aditivos para mejorar o mitigar la propiedad de permeabilidad del cemento y mantener o mejorar su resistencia.

En la actualidad, existen los diagramas de fases que permiten una mejor ubicación del producto según la relación de elementos mayoritarios que generalmente son: CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , como se observa en el **grafico 1** [22].

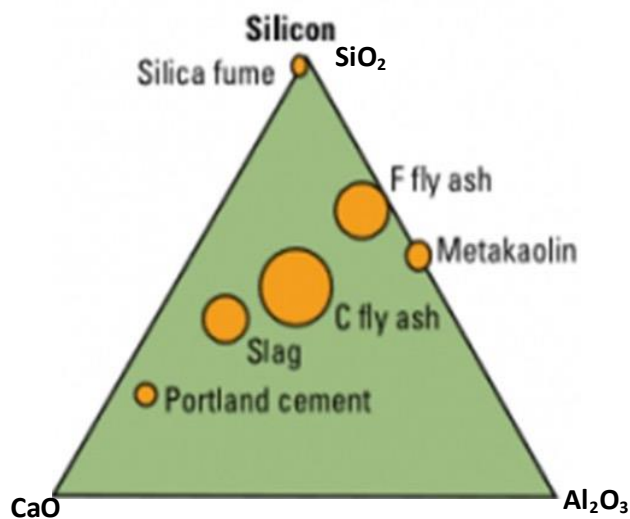


Gráfico 1. Diagrama de fase

Con la selección de las materias primas, se realizó el siguiente proceso a escala de laboratorio para la elaboración del cemento, como se ilustra en la **gráfica 2**.

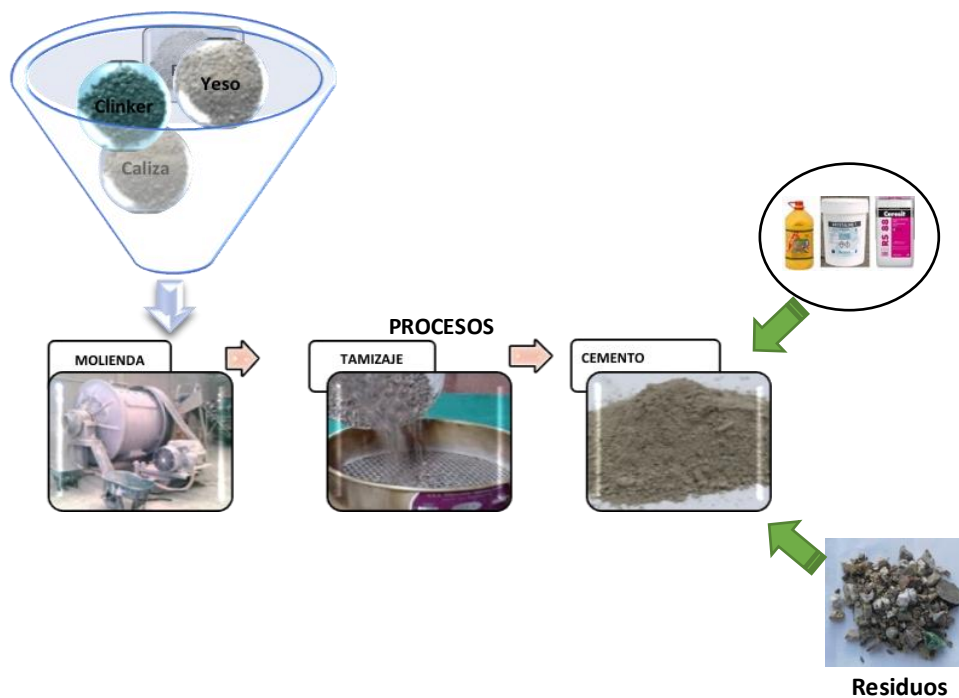


Gráfico 2. Flujograma de elaboración de cemento a nivel de laboratorio

Luego de obtener las muestras de cemento con las inclusiones de los aditivos, se procede a la realización de los morteros con la cantidad de cubos pertinentes para el cálculo de las resistencias a la compresión a las edades estipuladas (7 y 28 días), y absorción por capilaridad a las mismas edades.

Siguiendo las indicaciones de la norma NTC 220 ¹, las proporciones de masa para formar el mortero usado están compuestas por una parte de cemento y 2,75 partes de arena. Para los cementos, la cantidad de agua de amasado debe ser aquella que produzca una fluidez de 110 ± 5 en golpes con la mesa de flujo (**figura 12**), los cubos de 50 mm o 50,8 mm se apisonan en dos capas, después los moldes son curados por 24 horas, luego se desmoldan y se sumergen en agua saturada con cal hasta el momento del ensayo según la edad.



Figura 13. Mesa de flujo

La norma NTC 121², proporcionará los valores que servirán de guía en la caracterización de los materiales producidos (**tabla 3**) [23].

¹ Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado

² Especificación de desempeño para el cemento hidráulico

Tabla 3. Requeimientos físicos para tipos de cementos

Cement Type	Applicable Test Method	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Fineness	C 204	A	A	A	A	A	A
Autoclave length change, max, %	C 151	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Time of setting, vical test ^B	C 191						
Initial, not less than, minutes		45	45	45	45	45	45
Initial, not more than, minutes		420	420	420	420	420	420
Air content of mortar volume, %	C 185	C	C	C	C	C	C
Strength range ^D	C 109/C 109M						
1 day		---	10	---	---	---	---
3 days		10	17	10	5	5	---
7 days		17	---	17	10	10	5
28 days		---	---	---	17	---	17
Heat of hydration	C 186						
7 days, max, kJ/kg (kcal/kg)		---	---	---	---	290 (70)	250 (60)
28 days, max, kJ/kg (kcal/kg)		---	---	---	---	---	290 (70)
Mortar bar expansion	C 1038						
14 days, % max		0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Sulfate expansion (sulfate resistance) ^E	C 1012						
6 months, max, %		---	---	0.10	0.05	---	---
1 year, max, %		---	---	---	0.10	---	---

Tomado de NTC 121 (ASTM C1157-02) [23]

La **tabla 3** explica los valores que se deben cumplir normativamente en las propiedades físicas más relevantes tales como resistencia a la compresión, tiempos de fraguado, expansión por autoclave y finuras (Blaine, malla 325), para diferentes tipos de cementos comerciales como HE o ART (Alta Resistencia Temprana), GU (Uso general), y otros productos cementicios de acuerdo a la necesidad del constructor. Estas abreviaciones se describen a continuación:

GU: Cemento Uso general

HE: Cemento ART (alta resistencia temprana)

MS: Medio resistente a los sulfatos

HS: Alta resistencia a los sulfatos

MH: Medio calor de hidratación

LH: Bajo calor de hidratación

7. Resultados y discusión

7.1. Caracterización química de las materias primas

La caracterización química de las materias primas a utilizar en la elaboración del cemento con propiedad impermeable se realizó mediante espectroscopía XRF obteniendo los resultados que se indican en la **tabla 4**. Estos resultados consisten en el análisis de tres tipos de Clinker (Oural, Kipas y Cimko), dos tipos de calizas (arroyo piedra y Colón), una escoria de alto horno (HKM) y un yeso, esto con el fin de identificar el mejor índice de hidraulicidad entre los materiales y la riqueza de la caliza en CaCO_3 .

Tabla 4. Caracterización química de materiales

Muestra	Na ₂ O(%)	MgO(%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	TiO ₂ (%)	MnO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SrO(%)	ZnO(%)	LOI(%)	total
Clinker Oural	0,08	1,54	6,04	20,54	0,13	1,98	1,37	65,14	0,27	0,06	2,80	0,04	0,02	N.D	100
Clinker Kipas	0,08	0,89	5,59	20,91	0,10	2,19	0,93	65,28	0,45	0,03	3,10	0,03	N.D	0,43	100
Yeso	N.D	0,04	0,23	1,49	0,02	44,94	0,05	31,97	N.D	N.D	0,11	0,10	N.D	21,10	100
Escoria Alto horno (HKM)	0,20	6,81	11,47	37,08	N.D	2,71	0,42	39,04	1,00	0,35	0,42	0,06	N.D	0,43	100
Caliza arroyo piedra	N.D	0,35	0,46	0,57	0,04	N.D	N.D	55,33	N.D	N.D	0,12	0,02	N.D	43,50	100
Clinker Cimko	0,20	3,30	5,00	20,20	N.D	1,50	0,56	64,90	N.D	N.D	3,50	N.D	N.D	N.D	99
Caliza Colón	N.D	0,20	1,40	2,50	N.D	N.D	0,10	53,70	N.D	N.D	0,60	N.D	N.D	41,00	100

Se realizó la selección y la dosificación teniendo en cuenta los resultados de composición obtenidos y el contenido teórico de los componentes químicos según la norma NTC 321 para un cemento [24].

De acuerdo a los resultados de la **Tabla 4**, se evidencia un alto porcentaje en óxidos de magnesio, aluminio y silicio en el Clinker Cimko lo que implica un buen desarrollo de hidratación por econsecuente se obtienen buenas resistencias, entre las calizas se eligió la caliza colón, yeso y la escoria de alto horno, debido a que se pretende realizar un cemento de bajo calor de hidratación por lo que sería el material necesario en la preparación de la mezcla cementicia[17]. Teóricamente, los componentes primarios de los materiales analizados son CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , y los secundarios: MgO , K_2O , Na_2O y Fe_2O_3

Se realizaron tres pruebas con el objetivo de obtener el conocimiento de los porcentajes en peso de los compuestos primarios (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO) y

secundarios (Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O) en el cemento, esto de forma teórica por medio de diagramas de ternarios, cada dosificación se indica en la **tabla 5**. Vale la pena resaltar que en la tercera prueba se decidió incorporar el clinker Oural para identificar si el material proporciona características que favorezcan su uso en la mezcla cementicia ya que con el Clinker Kipas, por los resultados de las pérdidas al fuego, se observa que contiene cal sin agotarse, lo que puede ocasionar en los cementos expansiones, fisuras y deterioros en las estructuras.

Tabla 6. Dosificaciones planteadas

Materias Primas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	%	%	%
Clinker Cimko	45,60	47,50	
Clinker Oural			42,75
Yeso	2,40	2,50	2,25
Caliza Colón	17,00	15,00	25,00
Escoria de alto horno (HKM)	35,00	35,00	30,00
Total, formula	100	100	100

En la **Tabla 7** se presentan los cálculos del porcentaje de los componentes primarios encontrados para cada una de las pruebas realizadas, La prueba 1 y 2 consiste en diferenciar lo que ocasiona, en tener la mayor cantidad de Clinker en la formula y la prueba 3 se utiliza otro tipo de Clinker, se utiliza en un porcentaje menor que los otros debido a sus altas pérdidas al fuego y en la **Tabla 8** se presenta el porcentaje de componentes secundarios.

Calculo de componentes primarios:

Tabla 7. Componentes Primarios calculado

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
	%	%	%
Objetivo Normativo	26,00	6,00	66,00
Real calculado Prueba 1	23,30	6,80	60,30
Real calculado Prueba 2	23,60	6,90	59,80
Real calculado Prueba 3	21,30	6,70	63,80

Cálculo de componentes secundarios;

Tabla 8. Componentes secundarios calculados

Compuesto	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O
	%	%	%
Objetivo Normativo	5,00	2,00	0,80
Real calculado Prueba 1	5,90	2,50	0,80
Real calculado Prueba 2	6,00	2,50	0,80
Real calculado Prueba 3	4,30	2,00	1,10

De acuerdo con los resultados anteriores, debido a la similitud entre los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, en cuanto a los porcentajes de componentes primarios y secundarios, se escogió la dosificación de la prueba 1 debido a su similitud con los porcentajes previstos en el objetivo normativo (ver compuesto objetivo normativo, **tablas 7 y 8**). Con base a lo anterior, se elaboró un producto con características aceptables según norma NTC 321[24], ya que la composición del material es un indicador importante de la integridad del producto y su conocimiento permite identificar cambios en el material, como, por ejemplo, la incidencia en la inclusión de los aditivos. Con este proceso en mención logramos generar propiedades especiales en el cemento de acuerdo a la necesidad. En nuestro trabajo se realizó inclusiones de aditivos impermeables conocidos como Sika-1, Krystaline-1 y Henkel, como parte de innovación tomamos residuos plasticos como aditivos por ser materiales repelentes al agua, en trabajos

desarrollados por otras entidades universitarias o grupos de investigación [27, 28] han realizado tomando los residuos plásticos como forma de agregados, es totalmente diferente ya que están remplazando la arena por el residuo lo que conlleva a tener bajas resistencias.

7.2. Caracterización de aditivos

Los aditivos impermeabilizantes son un tipo de producto que ayudan a modificar la cantidad de poros que son producidos por los agregados y el cemento. El análisis de los aditivos Krystaline-1 y Henkel se realizó mediante espectroscopía de XPS generó los siguientes resultados, (Tabla 9).

Tabla 9. Análisis químico de aditivos

Nombre de muestra	LOI (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Mn ₃ O ₄ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)
KRYSTALINE -1	13,55	36,36	0,14	2,79	1,43	0,05	0,96	35,07	6,65	0,93	0,08	1,84
HENKEL	45,80	22,81	0,12	1,68	0,60	0,01	0,51	14,25	10,16	0,52	0,02	3,45

Se puede observar en la **tabla 9** que estos aditivos son a base de álcalis (Na₂O, K₂O), lo que puede conllevar por su alta adición en los cementos, futuros deterioros en las edificaciones

7.2.1. Caracterización de residuos plásticos como aditivos

Como se mencionó en la metodología, los residuos plásticos empleados en el trabajo están compuestos por los siguientes polímeros, en proporciones equivalentes: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), polietilentereftalato (PET). Como resultado de la mezcla de residuos plásticos, se logró una apariencia vitrea del material, la cual permite su análisis y por tanto la determinación de su composición (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis químico de residuos plásticos

Nombre de muestra	LOI (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Mn ₃ O ₄ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)
RESIDUOS PLASTICOS	88,77	2,21	0,036	0,58	0,3	0,006	0,26	5,95	0,110	0,89	0,015	0,96

Para realizar los ensayos de elaboración de la mezcla cementicia, se codificaron las adiciones con los diferentes aditivos de la siguiente manera: primero se tomó como referencia la **prueba 1**, muestra patrón (STD) como comparativo de las siguientes pruebas, a partir de las adiciones que van desde el 0,5% al 3,0% de los aditivos mencionados previamente, por ejemplo para los aditivos Sika1, Krystaline y Henkel se utilizan los porcentajes del 1,0% a 3,0% y 0,5% al 1,5% de residuos plásticos, los códigos generados para cada prueba se indican como columnas en la **tabla 11**:

Tabla 11. Codificación de muestras para ensayos

Materia prima	CÓDIGO DE MUESTRA
STD	STD
STD + 1,0% Sika 1	D01
STD + 2,0% Sika 1	D02
STD + 3,0% Sika 1	D03
STD + 1,0% Krystaline	D04
STD + 2,0% Krystaline	D05
STD + 3,0% Krystaline	D06
STD + 2,0% Henkel	D07
STD + 3,0% Henkel	D08
STD + 0,5% R. Plásticos	D09
STD + 1,0% R. Plásticos	D10
STD + 1,5% R. Plásticos	D11

7.3. Determinación de propiedades físicas

7.3.1. Finura por aparato Blaine

Para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire se pesó una cantidad de gramos 2,7422g de cemento ya que no todos tienen la misma porosidad. La muestra se introduce en la cámara, luego se coloca en el manómetro que contiene una solución orgánica higroscópica y se lee el descenso de esta solución durante un tiempo transcurrido (esta es expresada en términos de la superficie específica, como área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento o metros cuadrados por kilogramo de cemento).

Aunque la norma NTC 33(ASTM C 204-84) [29] (Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de aparato Blaine de permeabilidad al aire) puede emplearse para determinar la finura de otros materiales como calizas, cenizas, escorias, yesos, debe entenderse que, en general, se obtienen valores de finura relativos y no valores absolutos.

En la **tabla 12** presentan los resultados de las finuras por aparato Blaine de las muestras con los aditivos incorporados (estandar STD y D01-D11), excepto las muestras que contienen el aditivo Sika 1 no se analizaron ya que es una muestra líquida y la mezcla adopta dicho estado debido al agua de amasado, razón por la cual fue difícil su análisis teniendo en cuenta que se requiere que esté en fase sólida.

Con los resultados reportados, se analizó que la finura determinada por el aparato Blaine muestra la dimensión y la distribución de las partículas generando un acoplamiento que evita el paso del aire; por lo anterior, los resultados emitidos al incluir los aditivos de manera ascendente generan una mayor permeabilidad al aire con respecto al STD; de esta manera se evidencia que la mayor finura del material se presenta en las mezclas cementicias que contienen los residuos plásticos (**Tabla 12**). Se especifica que, el porcentaje de adición de los residuos poliméricos es menor (0,5 - 1,5 %, **Tabla 11**) debido a la menor disponibilidad del material, en comparación con los aditivos comerciales, sin embargo, se destaca que aún cuando se emplea una menor dosificación en comparación con las demás materias primas, se obtiene un mejor resultado de finura del material.

Tabla 12. Resultados de finura Blaine

Materia prima	CÓDIGO DE MUESTRA	BLAINE (cm ² /g)
STD	STD	5814
STD + 1,0% Sika- 1	D01	N/A
STD + 2,0% Sika- 1	D02	N/A
STD + 3,0% Sika- 1	D03	N/A
STD + 1,0% Krystaline-1	D04	6455
STD + 2,0% Krystaline-1	D05	6559
STD + 3,0% Krystaline-1	D06	6592

STD + 2,0% Henkel	D07	6393
STD + 3,0% Henkel	D08	6419
STD + 0,5% R. Plásticos	D09	6010
STD + 1,0% R. Plásticos	D10	6398
STD + 1,5% R. Plásticos	D11	6486

7.3.2. Finura del cemento por malla 325 (45 μ) NTC-291

Se pesó una muestra de cemento (1g), en un tamiz de 45 μ m (N° 325) según norma NTC-291 como se observa en la **figura 13** [10]. La muestra se humedece minuciosamente con agua con una boquilla rociadora. Se realizó este procedimiento a una presión especificada según norma (70 kPa). La malla en conjunto con el cemento es secada en una estufa, y después de enfriarse se determinó su masa. Con estos valores y el valor de corrección de la malla se obtiene la finura del cemento cuyo resultado fue del 95% para el STD y una mejora a la finura de la muestra D11 (STD + 1,5% residuos plásticos). Los resultados de las pruebas realizadas se observan en la **tabla 13**.

Tabla 13. Resultados finura malla 325

Materia prima	CODIGO DE MUESTRA	Malla 325 según NTC-294
STD	STD	95.17
STD + 1,0% Sika- 1	D01	N/A
STD + 2,0% Sika- 1	D02	N/A
STD + 3,0% Sika- 1	D03	N/A
STD + 1,0% Krystaline-1	D04	95.32
STD + 2,0% Krystaline-1	D05	95.40
STD + 3,0% Krystaline-1	D06	95.45
STD + 2,0% Henkel	D07	95.40
STD + 3,0% Henkel	D08	95.60
STD + 0,5% R. Plásticos	D09	95.87
STD + 1,0% R. Plásticos	D10	95.93

STD + 1,5% R. Plásticos	D11	96.17
-------------------------	-----	-------



Figura 14. Malla 325 NTC-291

7.3.3. Fraguado al cemento con aguja vicat Método A

Para esta prueba se mezclaron las muestras de cemento desarrolladas, con una cantidad apropiada de agua, de tal modo que se obtenga una consistencia definida (consistencia normal). Se obtiene una masa plástica que conserva su plasticidad durante un tiempo determinado; a continuación, se produce un aumento brusco de su viscosidad, simultáneamente un incremento de la temperatura de la pasta, que se pone de manifiesto por la resistencia que la masa ejerce a la penetración de una aguja (principio del fraguado).

Esta prueba se realizó a la muestra patrón (STD), la cual no contiene ningún aditivo, aspecto que permite comparar las siguientes pruebas con las adiciones a diferentes porcentajes de los aditivos seleccionados; los resultados de las pruebas mencionadas se observan en la **tabla 14** y **grafica 5**. Con base en los resultados obtenidos se puede analizar que, a partir del primer momento, la masa va adquiriendo mayor rigidez y su resistencia a la penetración va aumentando, hasta que cesa su deformabilidad y se transforma en un bloque rígido (final del fraguado,

Tabla 14); su determinación es convencional ya que la reacción de hidratación continúa a lo largo del tiempo y las resistencias mecánicas del bloque (endurecimiento) por cada grupo de muestras, crecen regularmente.

Tabla 14. Resultados de fraguados

Materia prima	CÓDIGO DE MUESTRA	FRAGUADO INICIAL Minutos	FRAGUADO FINAL Minutos
STD	STD	135	180
STD + 1,0% Sika 1	D01	140	190
STD + 2,0% Sika 1	D02	145	220
STD + 3,0% Sika 1	D03	155	225
STD + 1,0% Krystaline-1	D04	223	285
STD + 2,0% Krystaline-1	D05	240	330
STD + 3,0% Krystaline-1	D06	255	340
STD + 2,0% Henkel	D07	163	245
STD + 3,0% Henkel	D08	180	255
STD + 0,5% R. Plásticos	D09	115	190
STD + 1,0% R. Plásticos	D10	150	195
STD + 1,5% R. Plásticos	D11	160	200

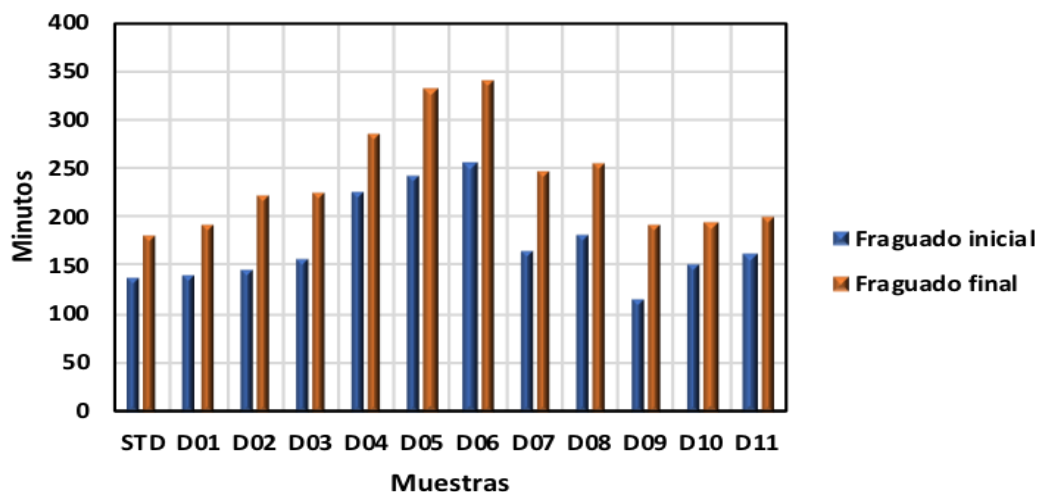


Gráfico 3. Resultados de fraguados

En la **gráfica 3** se ilustran los resultados de este ensayo y se observa como el fraguado incrementa con las adiciones de los aditivos en relación con el patrón (STD), pero son más altos con la adición del Krystaline en los diferentes porcentajes y con los residuos plásticos se obtienen valores cercanos a la muestra patrón (STD).

7.3.4. Determinación de expansión por autoclave

El objetivo de esta prueba es la determinación de la inalterabilidad del volumen del cemento, o conocida también como prueba de sanidad del cemento; la sanidad se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retardada o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades de cal libre o de magnesia. Casi todas las especificaciones normativas como se ilustra en la **tabla 3**, para el cemento limitan los contenidos de magnesia (periclase), así como la expansión registrada en la prueba de autoclave, para los cementos porlandt que distribuye Argos registran en su ficha técnica de producto una expansión de 0,8% cumpliendo al límite con este requisito [31]

Los resultados emitidos por el ensayo se observan en la **tabla 15** y en el **gráfico 4**.

Tabla 15. Resultados expansión por autoclave

Materia prima	Código muestra	Lectura Inicial (mm)	Lectura Final (mm)	% Expansión Barra
STD	STD	0,0042	0,0043	0,0010
STD + 1,0% Sika 1	D01	0,0036	0,0038	0,0020
STD + 2,0% Sika 1	D02	0,0051	0,0055	0,0040
STD + 3,0% Sika 1	D03	0,0048	0,0058	0,0100
STD + 1,0% Krystaline	D04	0,0056	0,0065	0,0090
STD + 2,0% Krystaline	D05	0,0087	0,0090	0,0030
STD + 3,0% Krystaline	D06	0,0090	0,0091	0,0010
STD + 2,0% Henkel	D07	0,0063	0,0068	0,0050

STD + 3,0% Henkel	D08	0,0045	0,0051	0,0060
STD + 0,5% R. Plásticos	D09	0,0100	0,0103	0,0030
STD + 1,0% R. Plásticos	D10	0,0013	0,0022	0,0090
STD + 1,5% R. Plásticos	D11	0,0008	0,0018	0,0100

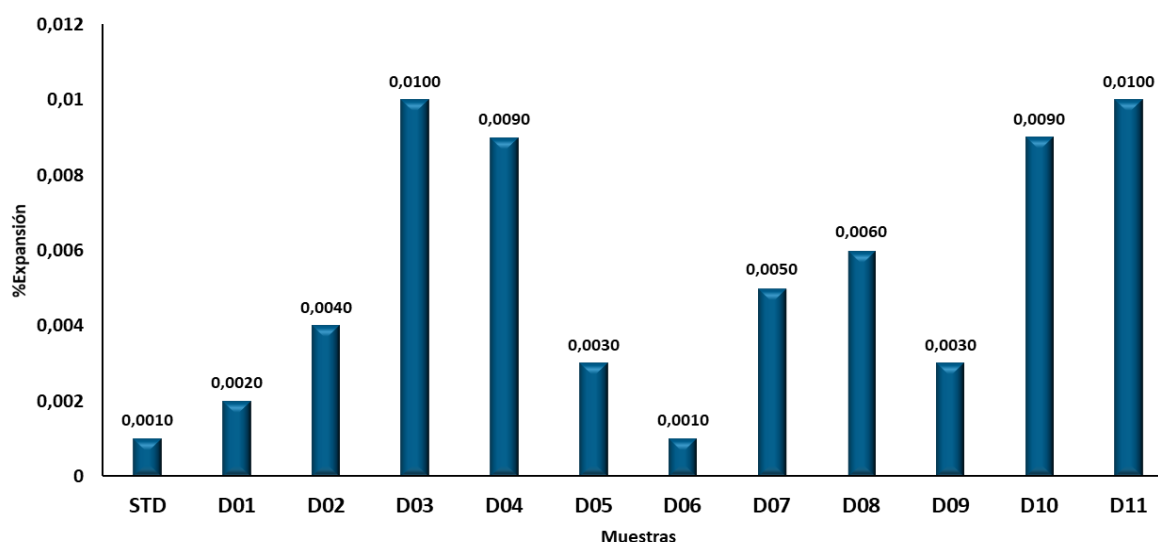


Gráfico 4. Representación gráfica de la expansión por autoclave

Los resultados de expansión por autoclave emitidos según norma NTC121 [10], cumplen con el objetivo (valor máximo de expansión: 0,8%). La muestra patrón (STD) está muy por debajo de este parámetro (0,0010%), y las muestras con los aditivos (D09-D11) generan expansiones de forma ascendente, en el rango de 0,0030% - 0,0100%, excepto las muestras con el aditivo Krystaline que acciona de forma inversa, esto se debe a que el aditivo en mención contiene en su composición CaO mas que los otros este compuesto al quedar libre genera expansiones en las estructuras cementicias generando con el tiempo deterioros o derrumbes de la estructura, sin embargo, todas están dentro del rango según norma.

7.3.5. Determinación de resistencia a la compresión

Este parámetro es de mucha importancia para la producción de cementos, ya que en conformidad con norma NTC121, para los cementos de bajo calor de hidratación que son los que contienen escoria en su formulación, (como los empleados en el producto desarrollado en el presente proyecto), estos deben cumplir con una resistencia a la compresión de 250 kgf/cm² (24MPa) para garantizar una alta eficiencia en su uso. Las pruebas de resistencia a la compresión fueron realizadas a la muestra patrón (STD) que es un cemento sin aditivo impermeabilizante con el fin de comparar las muestras a las que se incorporaron los aditivos en diferentes porcentajes, los resultados de las pruebas curadas a siete y veintiocho días se presentan en la **tabla 16**, **gráfico 7** y **8**.

Tabla 16. Resultados resistencia a la compresión

Código de muestra	Relación Agua/Cemento	Flujo (%)	Resistencia a 7 días (kgf/cm ²)	Resistencia a 28 días (kgf/cm ²)
STD	0,508	112	336,8	421
D01	0,506	112	328,6	428
D02	0,506	108	305,1	398
D03	0,508	108	304,0	376
D04	0,512	112	328,8	421
D05	0,486	108	339,5	437
D06	0,476	109	313,0	400
D07	0,488	108	316,6	385
D08	0,486	108	314,8	371
D09	0,512	112	338,1	447
D10	0,488	108	339,6	461
D11	0,486	109	355,8	391

Con los resultados reflejados en la **tabla 16** se observa que, con la incorporación de aditivos, todas las muestras superaron el valor planteado 250 kgf/cm², específicamente las muestras que contienen residuos plásticos (muestras D09-D10), superó la resistencia comparada a la muestra STD a siete y veintiocho días, logrando valores de resistencia entre 338 - 447 kgf/cm² y 339 - 461 kgf/cm². Si bien, se han cumplido los valores de resistencia esperados, se analiza que con el aumento de las inclusiones de residuos plásticos se genera una disminución de la resistencia del material con respecto al estandar (STD), el mismo comportamiento

es observado para las muestras con aditivo Sika 1 (D01-D03) y para los casos de Krystaline-1 (D04-D06), tienen punto de inflexión donde la mayor resistencia es con 1,0% y 2,0% de inclusión con el aditivo respectivamente, para las inclusiones con el aditivo Henkel (D06-D08) generan valores menores resistencia que el STD además con el mismo efecto de disminución de resistencia a mayor contenido de aditivo. De esta manera, es muy importante identificar la dosificación óptima de los aditivos empleados, en este caso dosificaciones del 0,5 y 1,0% para los residuos plásticos.

Los resultados obtenidos hasta esta etapa se ilustran en las siguientes graficas de cajas y bigotes (**gráfica 5 y 6**).

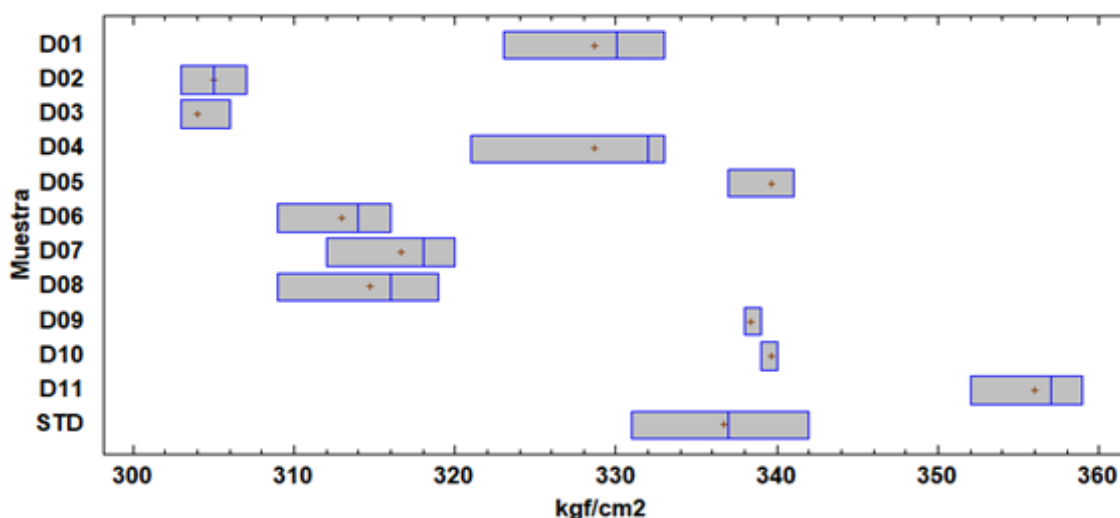


Gráfico 5. Resistencia a la compresión a 7 días

La **grafica 5** ilustra los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días de curado, donde las muestras evaluadas se encuentran muy dispersas en relación con la muestra estándar (STD), por ejemplo en la muestras D02 y D03 que contienen 2,0% y 3,0% de Sika-1 tienen resistencias de 328,6 y 305,1 kgf/cm² comparado con 336,8 kgf/cm², lo anterior debido a la presencia de aditivos de composición diversa como se indicó al inicio de la sección de resultados (**Tablas 9 y 10**).

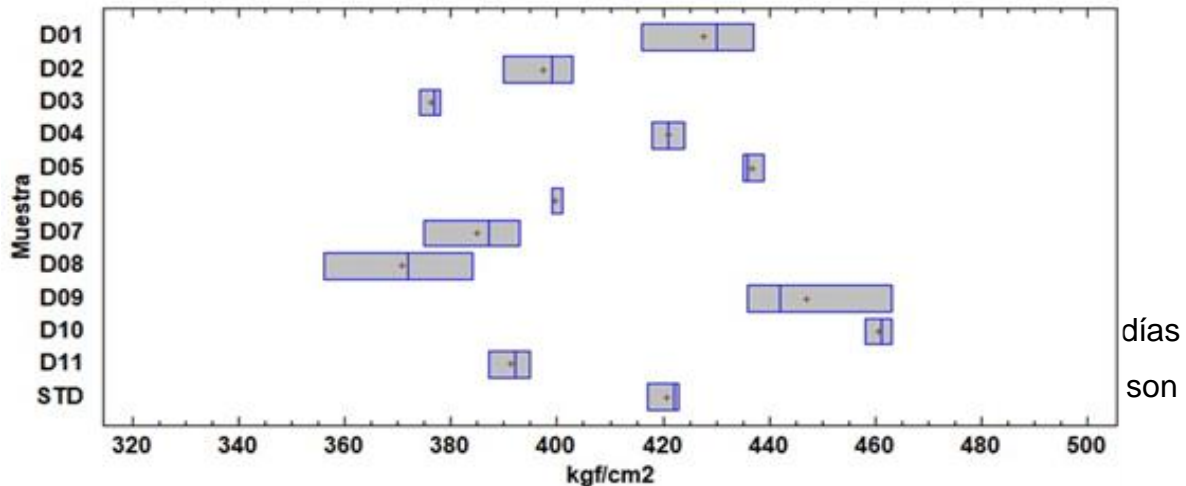


Gráfico 6. Resistencia a la compresión a 28 días

En la **gráfica 6** podemos observar el desarrollo de la resistencia de las muestras, pero aún las que contienen los aditivos Sika-1 y Henkel están por debajo del STD 398 y 376 kgf/cm² comparado con 421 kgf/cm², en cambio con las adiciones de los residuos plásticos siempre mostramos mejores resultados un ejemplo es la D10 (1,0%) con 461 kgf/cm².

7.4. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a 7 días

Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	8247,58	10	824,758	59,17	0,0000
Intra grupos	306,667	22	13,9394		
Total (Corr.)	8554,24	32			

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 59,17, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 11 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias

son significativamente diferentes de otras, se realiza una prueba de Múltiples Rangos, como se indica a continuación.

7.4.1. Pruebas de Múltiples Rangos

Tabla 17. Metodo 95,0 porcentaje LSD

Código muestra	Casos	Media	Grupos Homogéneos
D03	3	304,0	X
D02	3	305,0	X
D06	3	313,0	X
D08	3	314,6	X
D07	3	316,6	X
D01	3	328,6	X
D04	3	328,6	X
STD	3	336,6	X
D09	3	338,3	X
D05	3	339,6	X
D10	3	339,6	X
D11	3	356,0	X

Con el análisis estadístico realizado se logra la dispersión de datos en función de los valores obtenidos para las resistencias de las muestras con contenido de aditivo con respecto al patrón STD, estos valores son obtenidos después de 7 días de curado en agua con cal saturada.

7.5. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión a 28 días

Tabla 18. Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	27297,0	11	2481,55	42,97	0,0000

Intra grupos	1386,0	24	57,75		
Total (Corr.)	28683,0	35			

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 42,97, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 12 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realiza una prueba de Múltiples Rangos, como se indica a continuación.

7.5.1. Pruebas de Múltiple Rangos

Tabla 19. Método 95,0 porcentaje LSD

Código muestra	Casos	Media	Grupos Homogéneos
D08	3	370,6	X
D03	3	376,3	X X
D07	3	385,0	X X
D11	3	391,3	X X
D02	3	397,3	X X
D06	3	399,6	X
STD	3	420,6	X
D04	3	421,0	X
D01	3	427,6	X X
D05	3	436,6	X X
D09	3	447,0	X
D10	3	460,6	X

Con el análisis estadístico de los resultados de la resistencia a 28 días de curado se observa la evolución de esta propiedad ver **tabla 19**, ajustándose mucho más entre los grupos con relación al STD

7.6. Calculo de permeabilidad por capilaridad

La permeabilidad se define como la propiedad que establece la aptitud de un medio poroso a ser atravesado por un fluido en presencia de un gradiente de presión [11]. Dicho gradiente puede ser originado por diferencia de presiones hidrostáticas o por efectos de las tensiones capilares.

Dadas las características del sistema, de poros de la estructura de la pasta de cemento endurecida, los fenómenos capilares tienen una influencia significativa en los mecanismos de transporte. La absorción capilar es el mecanismo de transferencia rápida de líquidos, y la determinación de la capacidad de absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa, como ilustración de lo anterior se puede apreciar este fenómeno en los cubos sumergidos a una altura de 10mm y se observa como se logra desplazar el agua mas de la altura estipulada ver **Anexo 5**

Los resultados de permeabilidad de las muestras cementicias son expresados en las **tablas 19, 20 y 21** y en las **gráficas 7 y 8**, como se explica a continuación:

Tabla 20. Resultados de permeabilidad por capilaridad

Materia prima	Código muestra	Permeabilidad a los 7 días	Permeabilidad a los 28 días
STD	STD	5,22E ⁻⁰³	6,99E ⁻⁰³
STD + 1,0% Sika 1	D01	3,90E ⁻⁰³	5,96E ⁻⁰³
STD + 2,0% Sika 1	D02	3,98E ⁻⁰³	6,14E ⁻⁰³
STD + 3,0% Sika 1	D03	4,26E ⁻⁰³	6,75E ⁻⁰³
STD + 1,0% Krystaline-1	D04	5,44E ⁻⁰³	6,25E ⁻⁰³
STD + 2,0% Krystaline-1	D05	4,38E ⁻⁰³	5,46E ⁻⁰³
STD + 3,0% Krystaline-1	D06	5,80E ⁻⁰³	6,99E ⁻⁰³

STD + 2,0% Henkel	D07	2,97E ⁻⁰³	4,46E ⁻⁰³
STD + 3,0% Henkel	D08	3,19E ⁻⁰³	4,26E ⁻⁰³
STD + 0,5% R. Plásticos	D09	5,06E ⁻⁰³	4,34E ⁻⁰³
STD + 1,0% R. Plásticos	D10	4,36E ⁻⁰³	3,59E ⁻⁰³
STD + 1,5% R. Plásticos	D11	5,50E ⁻⁰³	3,69E ⁻⁰³

Los resultados emitidos en la **tabla 20** indican el módulo de permeabilidad por capilaridad en las muestras analizadas por lo que las muestras con el contenido de aditivo Sika-1 y residuos plásticos tienden a ser más impermeables que el patrón, siendo curadas a los 7 y 28 días, por lo que las muestras con Krystaline presentan mayor permeabilidad que todas las analizadas, es probable que este efecto ocurra mas con este aditivo por su alto contenido en calcio (CaO) y sílice (SiO₂) ya que estos elementos generan porosidad en la evolución del cemento.

Tabla 21. Resultados de permabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 7 días

Codigo muestra	$\frac{W}{A} = S$	$S * \sqrt{t}$					
		30	60	90	120	180	1440
STD	5,22E-03	1,18E-02	2,21E-02	2,97E-02	3,64E-02	5,18E-02	1,98E-01
D01	3,90E-03	3,06E-03	1,48E-02	1,95E-02	2,38E-02	3,34E-02	1,48E-01
D02	3,98E-03	8,40E-03	1,54E-02	2,04E-02	2,62E-02	3,61E-02	1,51E-01
D03	4,26E-03	1,00E-02	1,76E-02	2,34E-02	2,86E-02	3,96E-02	1,62E-01
D04	5,44E-03	1,43E-02	2,27E-02	3,04E-02	3,73E-02	4,94E-02	2,06E-01
D05	4,38E-03	1,15E-02	1,85E-02	2,46E-02	3,03E-02	3,98E-02	1,66E-01
D06	5,80E-03	1,63E-02	2,68E-02	3,67E-02	4,60E-02	6,20E-02	2,20E-01
D07	2,97E-03	8,07E-03	1,30E-02	1,74E-02	2,16E-02	2,83E-02	1,13E-01
D08	3,19E-03	8,95E-03	1,42E-02	1,89E-02	2,36E-02	3,07E-02	1,21E-01
D09	5,06E-03	1,24E-02	2,05E-02	2,93E-02	3,58E-02	4,76E-02	1,92E-01
D10	4,36E-03	9,82E-03	1,65E-02	2,34E-02	2,88E-02	3,82E-02	1,66E-01
D11	5,50E-03	1,34E-02	2,25E-02	3,19E-02	3,88E-02	5,10E-02	2,09E-01

Los resultados emitidos en la tabla anterior muestran la permeabilidad a 7 días por el tiempo expuesto al agua, por lo que es de resaltar que los aditivos Sika 1 y los residuos plásticos tienen un buen comportamiento, lo contrario sucede con las adiciones de Krystaline. Este comportamiento se observa mejor en la **gráfica 7**.

Donde podremos identificar las curvas generadas por los valores emitidos y de esta forma evidenciar la mejora.

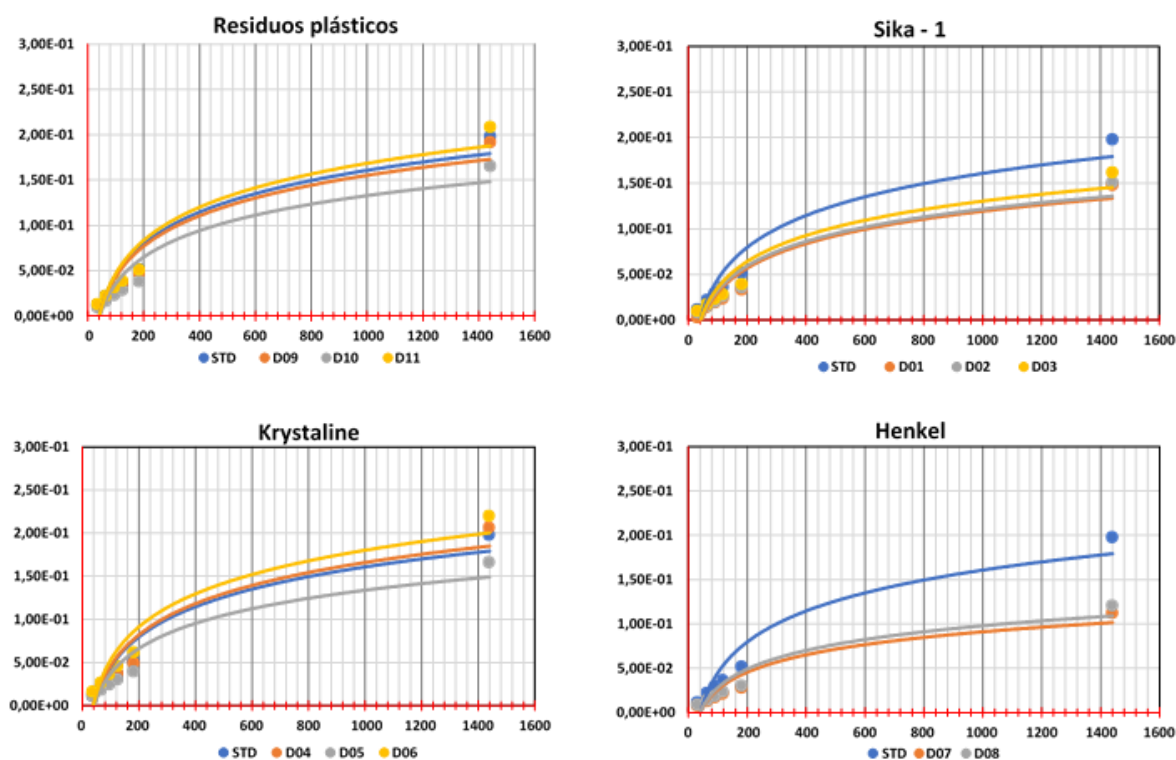


Gráfico 7. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 7 días

Tabla 22. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 28 días

Código muestra	$\frac{W}{A} = S$	$S * \sqrt{t}$					
		30	60	90	120	180	1440
STD	6,99E ⁻⁰³	2,08E ⁻⁰²	3,24E ⁻⁰²	4,42E ⁻⁰²	5,85E ⁻⁰²	7,86E ⁻⁰²	2,65E ⁻⁰¹
D01	5,96E ⁻⁰³	1,43E ⁻⁰²	2,48E ⁻⁰²	3,34E ⁻⁰²	4,52E ⁻⁰²	6,09E ⁻⁰²	2,26E ⁻⁰¹
D02	6,14E ⁻⁰³	1,39E ⁻⁰²	2,42E ⁻⁰²	3,31E ⁻⁰²	4,28E ⁻⁰²	5,83E ⁻⁰²	2,33E ⁻⁰¹
D03	6,75E ⁻⁰³	1,53E ⁻⁰²	2,84E ⁻⁰²	3,95E ⁻⁰²	5,06E ⁻⁰²	6,82E ⁻⁰²	2,56E ⁻⁰¹
D04	6,25E ⁻⁰³	1,47E ⁻⁰²	2,62E ⁻⁰²	3,67E ⁻⁰²	4,71E ⁻⁰²	6,17E ⁻⁰²	2,37E ⁻⁰¹
D05	5,46E ⁻⁰³	1,33E ⁻⁰²	2,38E ⁻⁰²	3,27E ⁻⁰²	4,06E ⁻⁰²	5,37E ⁻⁰²	2,07E ⁻⁰¹
D06	6,99E ⁻⁰³	1,64E ⁻⁰²	3,16E ⁻⁰²	4,44E ⁻⁰²	5,70E ⁻⁰²	7,86E ⁻⁰²	2,65E ⁻⁰¹
D07	4,46E ⁻⁰³	1,04E ⁻⁰²	1,84E ⁻⁰²	2,55E ⁻⁰²	3,25E ⁻⁰²	4,36E ⁻⁰²	1,69E ⁻⁰¹
D08	4,26E ⁻⁰³	9,27E ⁻⁰³	1,70E ⁻⁰²	2,40E ⁻⁰²	3,03E ⁻⁰²	4,12E ⁻⁰²	1,62E ⁻⁰¹
D09	4,34E ⁻⁰³	1,01E ⁻⁰²	1,68E ⁻⁰²	2,29E ⁻⁰²	2,95E ⁻⁰²	3,93E ⁻⁰²	1,65E ⁻⁰¹
D10	3,59E ⁻⁰³	8,29E ⁻⁰³	1,33E ⁻⁰²	1,81E ⁻⁰²	2,31E ⁻⁰²	3,07E ⁻⁰²	1,36E ⁻⁰¹
D11	3,69E ⁻⁰³	5,78E ⁻⁰³	1,05E ⁻⁰²	1,53E ⁻⁰²	2,07E ⁻⁰²	2,91E ⁻⁰²	1,40E ⁻⁰¹

En la tabla anterior, se obtienen los resultados de la permeabilidad por el tiempo a 28 días, aunque en esta fase de exposición las muestras con las incorporaciones de aditivos se comportan mejor que la muestra patrón, se resalta que las inclusiones con los residuos plásticos tienen mejor comportamiento, en especial la que contiene el 1,0%. Este comportamiento puede observarse en la **gráfica 8**.

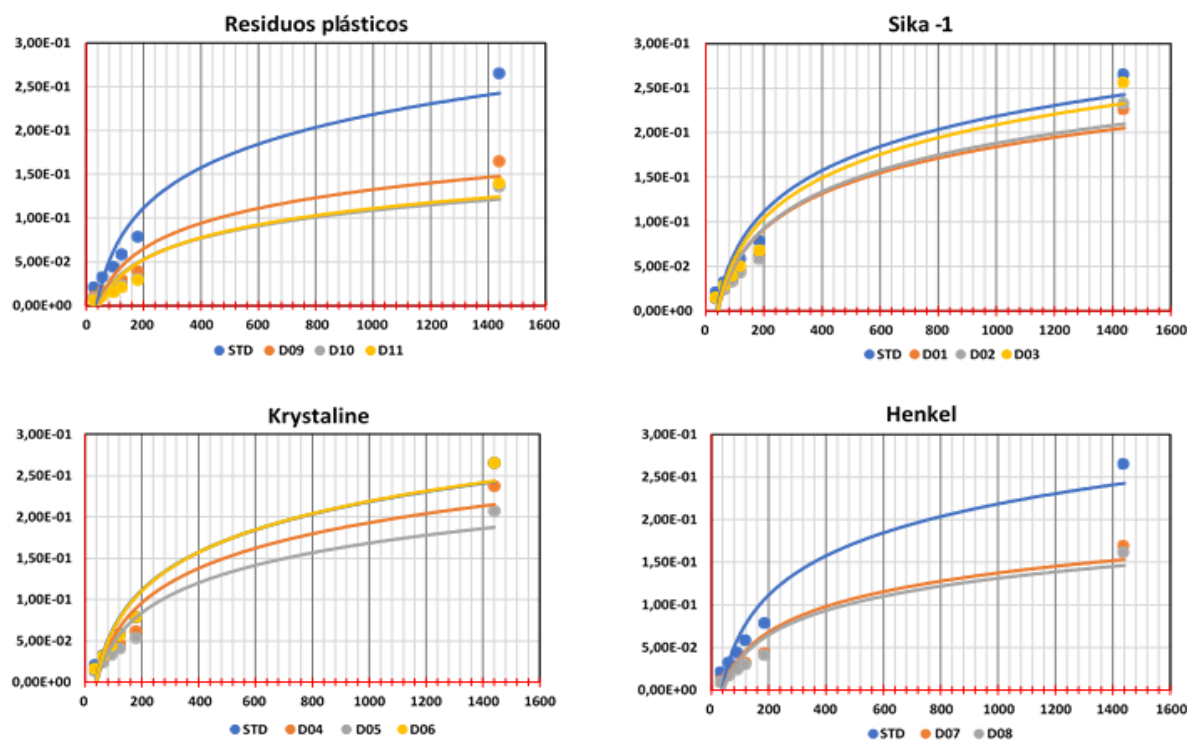


Gráfico 8. Resultados de permeabilidad por capilaridad sobre el tiempo a 28 días

En el gráfico 8 se observa la que los aditivos Sika-1 y Krystaline-1 tienden a ser mas permeables que el STD, por lo que los Henkel y los residuos plásticos son menos permeables, siendo que con los residuos plásticos se tienen mejores resultados.

Con los resultados obtenidos es posible identificar la interacción de la escoria actuando como componente hidráulico. La reactividad de la escoria se reduce cuando aumenta la desvitrificación este proceso consiste en donde las fases amorfas de la escoria se rompen cuando pasa de la zona de calentamiento a

enfriamiento rápido en el alto horno, sin embargo, la relación entre el contenido de vidrio en la escoria y la resistencia desarrollada por cementos de escorias no es lineal.

Para la mejora de la resistencia a la compresión es importante emplear en la dosificación, materiales que sean activos para que desarrollen cierta resistencia a tiempos definidos, para el caso de las escorias se requiere la ruptura de los enlaces químicos y la disolución de la red tridimensional de aluminosilicatos de la misma. Este proceso se puede ver favorecido y acelerado por la presencia, durante el proceso de hidratación de dicha escoria, de distintos activadores, por lo que se puede decir que el grado de hidraulicidad de la escoria depende de la cantidad y composición del vidrio y del activador que para este caso sería $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado en la hidratación.

Con los resultados de SEM, se detallan las segmentaciones de los granos establecidos en la mezcla con la cuantificación de los elementos encontrados para los resultados más relevantes como son los de la inclusión de los residuos plásticos al 1,0% en comparación con el STD, tal como se ilustra las siguientes gráficas 9 y 10.

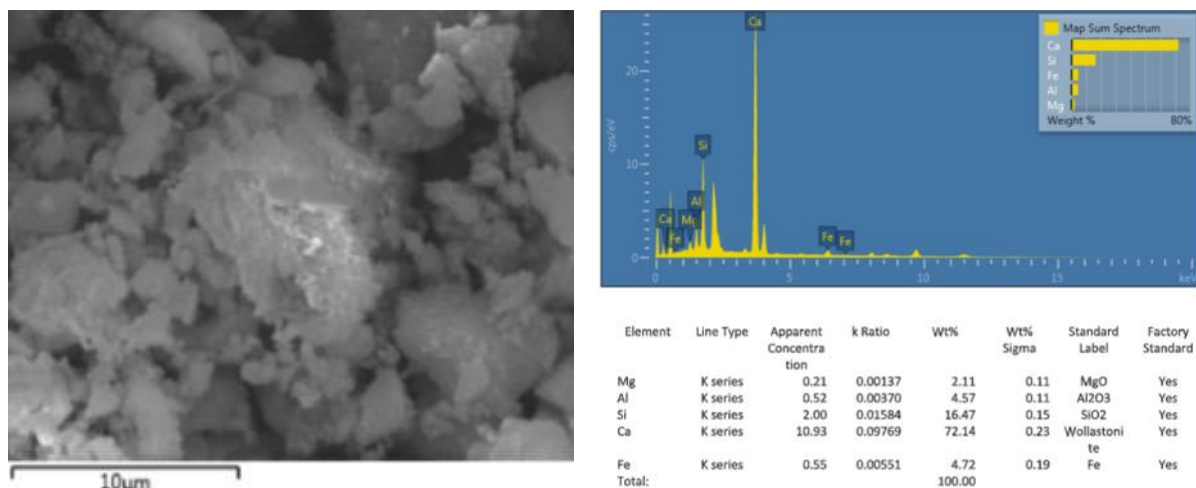


Gráfico 9. SEM de muestra con el 1,0% de residuos plásticos

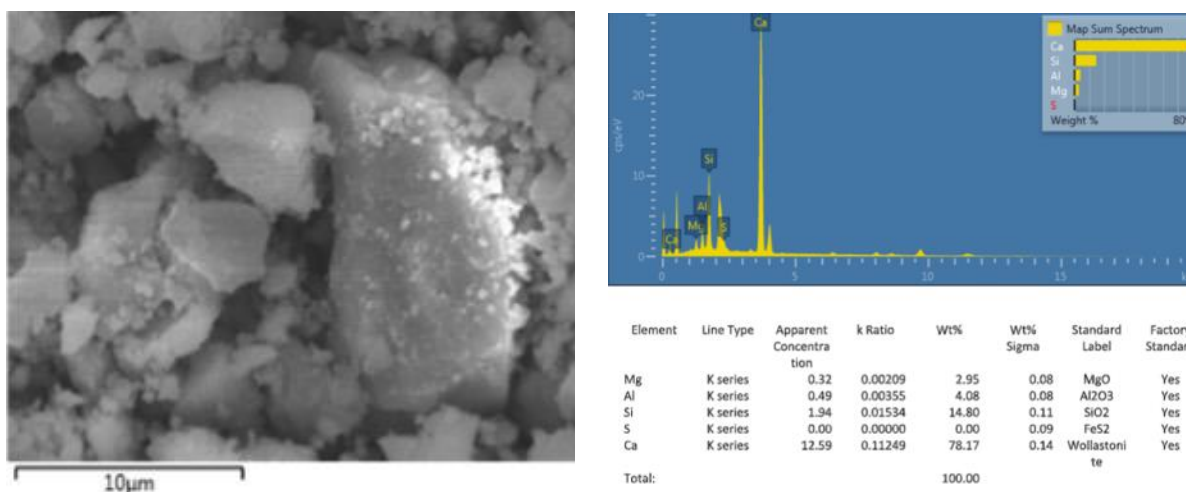


Gráfico 10. SEM muestra STD

Se puede observar en la **gráfica 9** que es la muestra con residuos plásticos contiene tamaño de grano más pequeño que el STD lo que explica su mejor reacción a la resistencia mecánica y permeabilidad.

Con los resultados obtenidos mediante espectroscopia XPS, se pueden verificar varios aspectos, como la posición de los componentes en el diagrama de fase, con el objeto de acercarnos a la posición de un cemento Portland y la eficiencia del método utilizado al momento de calcular el contenido de los elementos y la influencia de la inclusión de los aditivos, en este sentido, se anexan los resultados en la **tabla 23**

Tabla 23. Resultados XPS para muestras STD y 1,0% de residuos plásticos

MUESTRA	Pedidas al fuego	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cr ₂ O ₃	BaO
Cemento en desarrollo STD	8,22	21,31	0,41	6,25	1,90	0,12	3,44	54,41	0,37	0,53	0,06	2,77	0,01	0,07
1,0% Residuo Plástico (D10)	8,67	22,93	0,44	6,69	1,91	0,13	3,67	51,35	0,41	0,58	0,07	2,90	0,01	0,08

Con los valores obtenidos mediante XPS, en la tabla 23 se muestran los resultados obtenidos para los elementos primarios del cemento analizado. Se observa que las muestras tanto el STD como la muestra D10 (1,0% de residuos

plásticos) se encuentra en la zona teórica del cemento Portland. En síntesis, las muestras analizadas son similares en composición, pero los álcalis son relativamente altos en la muestra con residuos plásticos, reflejado en su caracterización química, que prevalecen el K_2O y Na_2O .

En investigaciones realizadas, el residuo plástico es utilizado mas como agregado, en donde se rempazan porcentajes de arena por el residuo, la intención es realizar tipos de adoquines que cumplan de acuerdo con un trafico especifico para el caso de esta temática y con fuente de elaboración propia su resistencia es de $100,63 \text{ kgf/cm}^2$ ($9,87 \text{ Mpa}$)[27], este desarrollo es debido a que los residuos plásticos no son reactivos como agregados por su estado ya definido, es decir no cambiaran de forma, no se expanden ni contraen, pero si ayudan para que su absorción sea baja (3%) donde por especificaciones internas para los adoquines es de 6%[27]

Para otros procesos donde la teoría es la misma utilizando los residuos plásticos como agregado en esta ocasión se realizan tipos de ladrillos y tejas para realizaciones de viviendas para acciones sociales, en las pruebas realizadas para esta propuesta se obtienen resistencia en los ladrillos realizado rempazando porcentaje de arena por residuos plásticos es de ($4,00 \text{ Mpa}$)[28], para las especificaciones internas de esta compañía la resistencia de sus ladrillos es de ($4,20 \text{ Mpa}$)[28], en conclusión con base a las investigaciones realizadas y en comparación con las pruebas realizadas en el proyecto en curso, se utilizó los residuos plásticos como aditivo, esto fundamenta en que el estado de los residuos es diferente ya que es pulverizado por debajo de $150 \mu\text{m}$ e incorporado en la matriz del cemento y no utilizado como agregado como en las investigaciones citadas, esto es lo que fundamenta el incremento de las resistencias en nuestra investigación

8. Conclusiones

Con las materias primas seleccionadas se desarrolló un producto con propiedades mejoradas en comparación con los estándares comerciales analizados. De acuerdo a lo anterior, se logró una mejora en las propiedades físicas del material cementicio, como la resistencia a la compresión y la permeabilidad de un cemento comercial, logrando valores de 300 a 460 kgf/cm² y valores de $6,99 \cdot 10^{-3}$ a $2,97 \cdot 10^{-3}$ m/s respectivamente., en comparación con estándares comerciales analizados, para los cementos ART obtuvieron resistencia de 436 kgf/cm² y cementos de Uso general 295 kgf/cm² y permeabilidad de $5,66 \cdot 10^{-3}$ y $6,89 \cdot 10^{-3}$ a 28 días respectivamente. Lo anterior, es consistente con el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Adicionalmente, se observó que el producto elaborado con una dosificación del 1,0% de residuos plásticos (muestra D10), se asemeja a una muestra comercial de cemento Portland, siendo este último el más utilizado en la industria cementicia debido a que fragua de forma lenta y es muy resistente. La resistencia de menor valor se observa para la muestra D08 correspondiente a la inclusión de 3,0% Henkel al STD, arrojando valores de 314 y 371 kgf/cm² a 7 y 28 días respectivamente, esto puede ser debido a que este aditivo en su composición química contiene mas álcalis (Na₂O, K₂O) y en mayores inclusiones conlleva a bajarla resistencia. Como prueba de esto, se observa en la micrografía por el SEM un tamaño de grano mas grande en comparación con las demás muestras (**ver Anexo 3**). Las muestras de D01 (1,0% Sika-1) y D05 (2,0% Krystaline-1) muestran valores progresivos de acuerdo a su hidratación mostrando mas uniformidad en su granulometría (**ver Anexo 2 y Anexo 4**)

Con el método de Electroscopia Fotoeléctrica de Rayos X (XPS) utilizado para el análisis de las muestras, en especial para la muestra patrón (STD), se obtuvo una eficiencia de 91% en la dosificación de materiales para la obtención de un cemento con propiedades mejoradas, para desarrollos de nuevos productos, la cuantificación de elementos en las materias primas es básico para la optimización

en la formulación final donde se pronostico un 60,3% de CaO ver **tabla 6** y se obtuvo un 54,4% de CaO ver **tabla 23**

En cuanto a las propiedades de fraguado, expansión por autoclave y finura por malla de 45 μ , las mezclas de cemento obtenidas cumplen con los parámetros establecidos por la norma NTC 121, presentando valores en el faraguado de 115 a 340 minutos, en la expansión por autoclave de 0,0010% a 0,0100% y en la finura malla 45 μ 95,17% a 96,17%.

Mediante las propiedades químicas de las materias primas utilizadas en la elaboración del producto, se puede predecir su composición final utilizando diagrama de ternarios, con el fin de lograr la mayor proximidad de los porcentajes en peso de los compuestos importantes de los cementos.

Finalmente, a nivel metodológico, se logró un aprendizaje significativo acerca del manejo y proceso para la elaboración del cemento, que en la actualidad está conformado por una industria muy robusta, la cual cuenta con equipos e instrumentos de alto riesgo, los cuales deben tratarse de acuerdo con las precauciones y especificaciones necesarias.

9. Recomendaciones y perspectivas.

Como resultado de la presente investigación se recomienda realizar una serie de pruebas con adiciones de escorias para encontrar el nivel óptimo de las propiedades a mejorar (resistencia mecánica, resistencia a los sulfatos, permeabilidad, calor de hidratación), ya que la escoria puede ser usada como aditivo del cemento. En este proyecto se adicionaron en un 30% para mejorar las propiedades antes mencionadas.

Con la finalidad de dar utilidad a los residuos plásticos generados, se espera continuar con el reciclado y su tratamiento para implementar su uso a nivel industrial e introducirlos en diferentes porcentajes en el proceso de molienda para la obtención del cemento.

Con el producto elaborado con residuos plásticos al 1%, se obtuvo el mejor resultado de resistencia y permeabilidad del material, por lo tanto, se plantea como propuesta realizar diseños de concretos para observar las mejoras de sus propiedades. Para los concretos, es importante la evaluación de la penetración de cloruros, ya que la escoria es un buen agente para disminuir esta propiedad.

Se recomienda la evaluación de presupuesto de los residuos plásticos como aditivos, ya que, por ser un producto proveniente de un proceso de reciclado, el valor como materia prima dependerá del tratamiento del material para su uso posterior, así como se mencionó en la metodología.

10. Referencias

- [1]. Ana M. Castañón, Santiago García Granda, Ana M. Guerrero, Fernando Gómez-Fernández. (2012 - marzo - 26). Estudio De Las Fases Mineralógicas Del Clínter En Una Cementera Española, Utilizando El Método De Rietveld. 2017 - 11 -10, De Scielo Sitio Web: [Http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Dyna/V79n173/A05v79n173.Pdf](http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Dyna/V79n173/A05v79n173.Pdf)
- [2]. Rosana Gaggino. (2008 - agosto). Ladrillos Y Placas Prefabricadas Con Plasticos Reciclados Aptos Para La Autoconstrucción. Revista Invi, Vol 23, Pp 137-163. <http://www.arpet.org/docs/Ladrillos-y-placas-prefabricadas-con-plasticos-reciclado>
- [3]. Gómez, M. S, Carvajal, A.M, Santelices, V. (2011). Influencia del polietileno de alta densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. Revista de la construcción, Vol #10 N°3, pp 110 - 121. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2011000300011
- [4]. Alba Cruz, Reyna Caridad; Cruz Álvarez, Juan José; Posada, Agustín Alfonso. (2013). Mejora del proceso en el control de la calidad para el diseño de los sistemas de impermeabilización en las edificaciones. Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol 7, pp 1- 51.
- [5]. Jan P. Skalny. (2000). Hidratación del cemento. 2017- diciembre-3, de Imcyc Sitio web: <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Hidratacion%20del%20Cemento/4%20>
- [6]. Asociación española de normalización y certificación. (2011). Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. 2018 abril 07, de AENOR Sitio web:

<file:///H:/documentos%20universidad/Proyecto%20de%20grado/1105-1496-1-PB.pdf>

[7]. Tatiana Lee Torres Hurtado, Claudia Elizabeth Mora Huertas. (2010). Aplicación de la microscopía electrónica de barrido en la evaluación de dos materias primas cosméticas como restauradoras de la cutícula capilar. 2018 agosto 16, de Scielo Sitio web: <http://www.scielo.org.co/pdf/rccqf/v39n1/v39n1a01.pdf>

[8]. Eneas Ramos Nascimento Neto, Carlos Salles Lambert, Edison Bittencourt, Zaida Aguila Jova. (2007). Combinación de análisis de XPS y análisis goniométrico para el estudio de la remoción del aceite superficial en aluminio utilizando plasma frío. 2018 agosto 21, de Scielo Sitio web: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012062302007000300008

[9]. Ing. Edgardo A. Becker. (2001). Cemento De Alto Horno Características y Recomendaciones de Uso. 2017 - 11 - 10, de Loma negra Sitio web: <http://www.fceia.unr.edu.ar/~fermar/Cementos/CEMENTO%20DE%20ALTO%20HOR>

[10]. ICONTEC. (2008-12-16). Concretos. Aditivos Químicos Para Concreto. 2017-11-08, de Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) Sitio web: <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC1299.pdf>

[11]. Mattio, María Eugenia. (2014). La Permeabilidad Al Agua Como Parámetro Para Evaluar La Durabilidad Del Hormigón. 2018 octubre 13, De Universidad Nacional De Cordoba Sitio web:

<https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1576/PS%20Mattio%2C%20Mar%C3%ADa%20Eugenia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[12]. José M Arandes, Javier Bilbao, Danilo López Valerio. (2004- marzo). Reciclado De Residuos Plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 5(1), pp 1-18. <http://www.arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-Revista-Iberoamericana-d>

[13]. José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Pérez y Pedro J. García Casado. (1995). Historia De Los Morteros. 2017-11-10, de Departamento de Química y Edafología, Facultad de Ciencias. Universidad de Navarra Sitio web: <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/download/263/263>

[14]. Juan R. Baracaño Coronas Y Julio Pérez Alonso. (1976). Estudio sobre el contenido óptimo de yeso en los cementos, su influencia en las resistencias iniciales. 2017-11-10, de Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons Sitio web: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile>

[15]. Tobón, Jorge Iván; Kazes Gómez, Rebeca. (2008 - noviembre). Desempeño Del Cemento Portland Adicionado Con Calizas De Diferentes Grados De Pureza. Dyna, Vol 75, pp 177-184 <http://www.redalyc.org/pdf/496/49612071018.pdf>

[16]. Juan R. Baracaño Coronas Y Julio Pérez Alonso. (1976). Estudio sobre el contenido óptimo de yeso en los cementos, su influencia en las resistencias iniciales. 2017-11-10, de Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons Sitio web: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile>

[17]. Ing. Edgardo A. Becker. (2001). Cemento De Alto Horno Características y Recomendaciones de Uso. 2017 - 11 - 10, de Loma negra Sitio web: https://S3.Amazonaws.Com/Academia.Edu.Documents/44905258/Cemento_Portl_a

[18]. Anie Karina da Rosa Carlos Henrique Michelin Ruth Campomanes. (enero 2011). Reciclaje de PET: evaluación de la eficiencia de separación del contaminante PVC. 2017 - 11 - 30, de REVISTA ECIPERU Sitio web: <http://www.ufrgs.br/lapol/reciclaje.pdf>

[19]. A. Meyer, Beckum. (1964). normas para la determinación de las resistencias del cemento. 2018 septiembre 3, de Materconstrucc Sitio web: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1779/2176>

[20]. Diego Anatolio Rodríguez Rairán Julián Alonso Gómez Calderón. (2014). Manual de guías de laboratorio enfocadas al control de calidad de Materiales Y Tecnología Del Concreto. 2018 septiembre 12, De Universidad Católica De Colombia Facultad De Ingeniería Sitio web: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1601/1/Manual_gu%C3%ADas_laboratorio_enfocadas_CC_materiales-tecnolog%C3%ADa_concreto.pdf.

[21]. Bizzotto, Marcela B - Astori, Raúl E - Sanquinetti, Bibiana M. (2006). Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA. 16 sep 2017, De Universidad Nacional Del Nordeste Sitio web: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/07-Tecnologicas/2006-T-067.pd>

[22]. Jherson E. Díaz, Silvia R. Izquierdo, Ruby Mejía de Gutiérrez y Marisol Gordillo S. (2013-12). Mezcla ternaria de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. Revista de la Construcción (Scielo), Vol. 12, pp 1-8 <http://www.scielo.cl/pdf/rconst/v12n3/art06.pdf>

[23]. ICONTEC. (1982-05-05). Ingeniería Civil Y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones Físicas Y Mecánicas. 2017-11-30, de Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación Sitio web: <http://zonanet.zonafrancabogota.com/www/resources/NTC%20121%20de%201982.p>

[24]. Icontec. (1982). Ingeniería Civil Y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones Químicas. 2019 marzo 25, De Zona Franca Bogotá Sitio Web: <Http://Zonanet.Zonafrancabogota.Com/Www/Resources/Ntc%20321%20de%201982.Pdf>

[25]. Juan Carlos Sierra. (2018). La mala racha de la industria cementera en Colombia. 2018 agosto 18, de Dinero Sitio web: <https://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/estado-de-las-cementeras-en-colombia/256335>

[26]. Manuel Torres Búa. (2014). Horno Alto. 2019 febrero 20, de Xunta de Galicia Sitio web: https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/422_horno_alto.html

[27]. Ayrton Pastor Castillo, Jean Pierre Salazar Oliva, Ricardo Seminario Regalado, Andrés Tineo Camacho, Jean Carlo Zapata. (2015). Diseño De Planta Productora De Adoquines A Base De Cemento Y Plástico Reciclado. 2019 febrero 20, De Universidad De Piura Sitio Web: <Https://Pirhua.Udep.Edu.Pe/Bitstream/Handle/11042/2343/5.%20pyt%2c%20infor>

[me%20final%2c%20cemento%20Y%20pl%C3%A1stico.Pdf?Sequence=1&Isallow
ed=Y](https://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20l/Articulo%207.pdf)

[28]. Víctor Flores, Jesús Rojas, Rodrigo Torres, Rolando Vallejos, Paola Flores y Mariana Flores. (2014). Mezclas de cemento y agregados de plástico para la construcción de viviendas ecológicas. 2019 febrero 20, de Ecorfan Sitio web: <https://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20l/Articulo%207.pdf>

[29]. Departamento De Mecánica Estructural. (1998). Determinacion De La Finura Del Cemento Portland Usando El Aparato De Permeabilidad Al Aire De Blain. 2019 marzo 25, De Universidad Centroamericana “Jose Simeon Cañas”, Uca Sitio Web: [Http://Www.Uca.Edu.Sv/Mecanica-Estructural/Materias/Materialescostruccion/Guiaslab/Ensayocemento/Determinacion%20de%20la%20finura%20del%20cemento%20portland.Pdf](http://Www.Uca.Edu.Sv/Mecanica-Estructural/Materias/Materialescostruccion/Guiaslab/Ensayocemento/Determinacion%20de%20la%20finura%20del%20cemento%20portland.Pdf)

[30]. Icontec. (2017). Determinación de la resistencia de morteros de Cemento Hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 Pulgadas de lado. 2019 marzo 20, de instituto colombiano de normas técnicas y certificación sitio Web: [Https://Tienda.Icontec.Org/Wp-Content/Uploads/Pdfs/Ntc220.Pdf](https://Tienda.Icontec.Org/Wp-Content/Uploads/Pdfs/Ntc220.Pdf)

[31]. Argos. (2018). Ficha técnica de cemento para concreto (ART). 2019 marzo 20, de Argos Sitio web: <https://colombia.argos.co/Portals/Colombia/Contenido/Conoce-nuestros-productos/Cemento/Uso-especializado/Cemento-Uso-Concretero/Argos-FT-CementoUsoConcretero.pdf>

11. Anexos

Anexo 1. Carta de aprobación de la compañía ULTRACEM para utilización de laboratorios y equipos.



ULTRACEM

Barranquilla noviembre 09 de 2017

SEÑORES:

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)
Escuela de ciencias básicas, tecnología e ingeniería
Programa de química
La ciudad

REF: Autorización de uso de instalaciones

Por medio de la presente yo, JAIME ALBERTO GARCÍA RODRÍGUEZ con cédula de ciudadanía número 72294907 de Barranquilla, siendo el líder gestión calidad de Cemento de ULTRACEM S.A.S, autorizo a JORGE LUIS RAMÍREZ ESCORCIA identificado con cédula de ciudadanía número 73.191.495 de Cartagena, quien trabaja actualmente con la compañía como analista de calidad, de hacer uso de las instalaciones del laboratorio, equipos y material de laboratorio como apoyo al desarrollo de su proyecto de investigación para su título universitario.

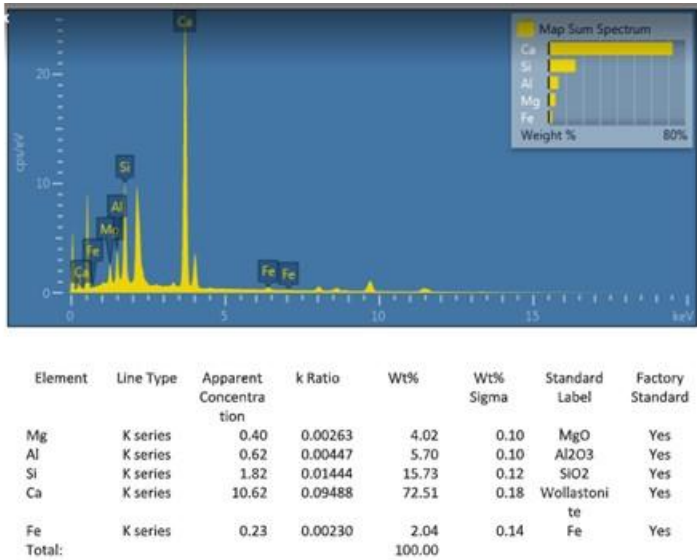
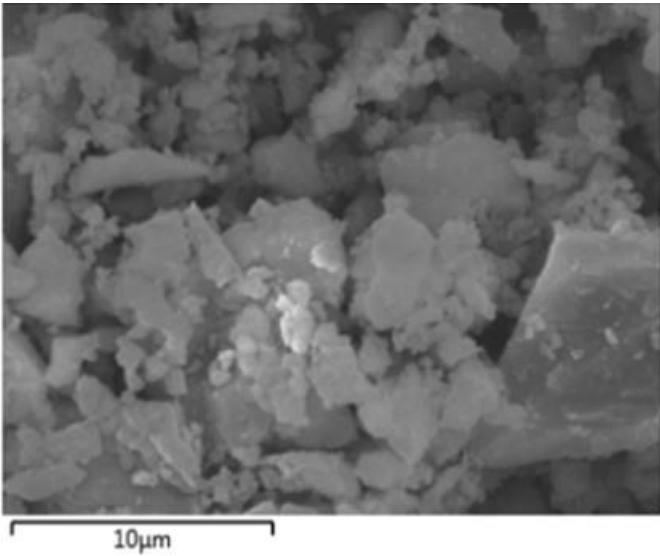
Cordialmente



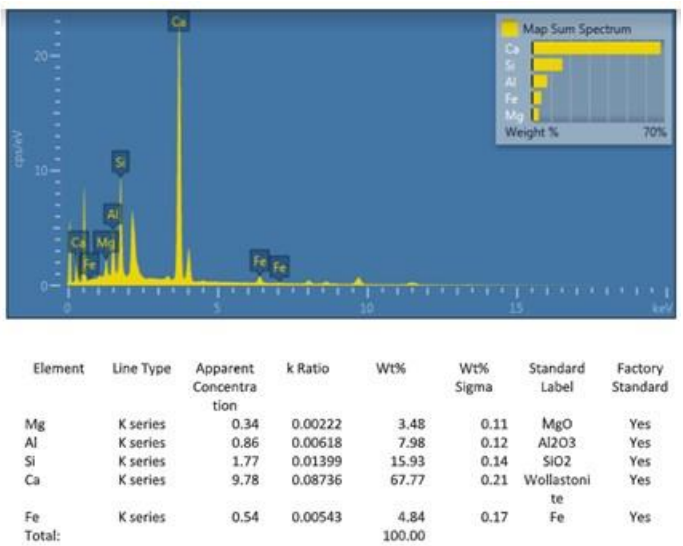
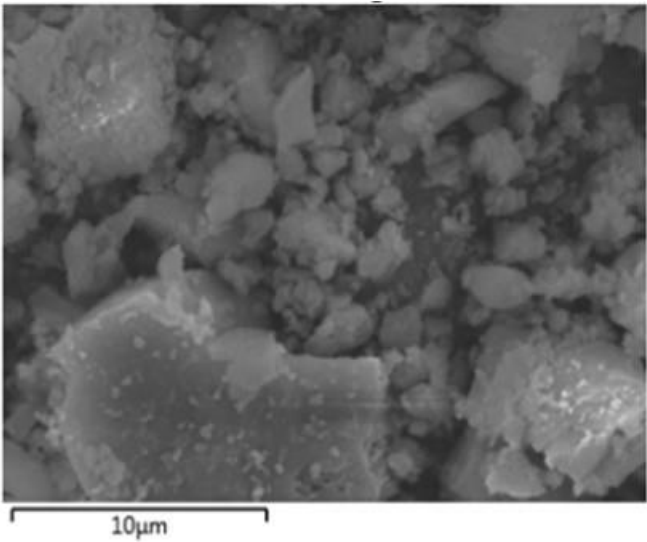
JAIME ALBERTO GARCÍA RODRÍGUEZ
C.C 72294907
líder gestión calidad de cemento

UltraGen S.A.S.
NIT. 900.570.364-4
Planta: Km. 2.5 Vía Cardenal de Barranquilla - Galapa
Atención al cliente: 01 8000 123 567
Celular: #359
Bogotá, Colombia - Colombia
www.ultracem.co

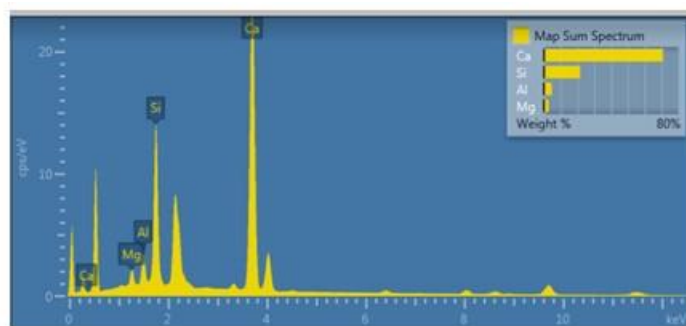
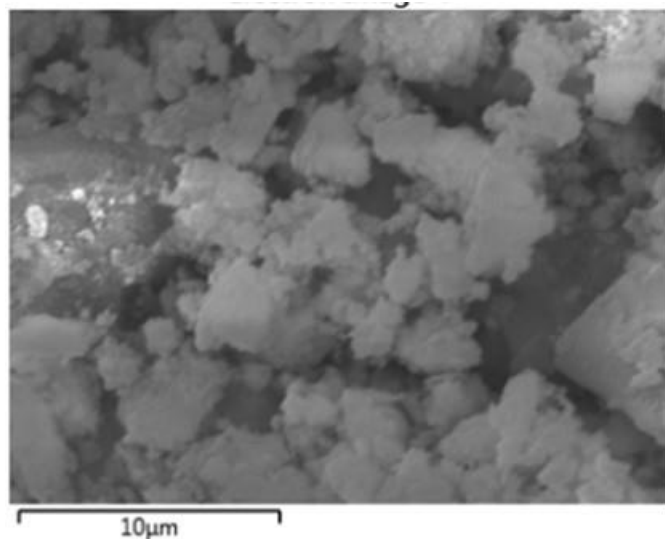
Anexo 2. Micrografía de muestra con 2% del aditivo Krystaline



Anexo 3. Micrografía de muestra con 3% del aditivo Henkel



Anexo 4. Micrografía de muestra con 1% del aditivo Sika-1



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard
Mg	K series	0.30	0.00197	2.80	0.08	MgO	Yes
Al	K series	0.57	0.00406	4.75	0.08	Al2O3	Yes
Si	K series	2.72	0.02152	21.61	0.12	SiO2	Yes
Ca	K series	10.58	0.09454	70.84	0.14	Wollastonite	Yes
Total:				100.00			

Anexo 5. Cubos sometidos a permeabilidad por capilaridad

